

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

Université Abderrahmane Mira-Bejaia

Faculté de la Technologie

Département d'Electrotechnique



MEMOIRE DE MAGISTER

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en
Electrotechnique

Option : Systèmes Electro-Energétiques

Présenté par :

RAMLI Aziz

Ingénieur d'état en électromécanique

THEME

CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DES PERFORMANCES D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MSAP

Soutenu le 14/07/2010, devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------|------------------|-----|-----------------|
| Président | Mr. A. ALKAMA | MCA | Univ. de Bejaia |
| Examineurs | Mr. A. GHERBI | MCA | Univ. de Sétif |
| | Mr. R. SAOU | MCA | Univ. de Bejaia |
| Rapporteurs | Mr. D. AOUZELLAG | MCA | Univ. de Bejaia |
| | Mr. K. GHEDAMSI | MCA | Univ. de Bejaia |

Remerciements


Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Mr. D. ADUZELLAG et Mr. K. GHEDAMSI, Maîtres de conférences à l'université de Bejaia, pour leurs précieux conseils, leur encouragement et surtout leur grande disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail. Je les remercie pour la confiance dont ils m'ont témoignés.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à Mr. A. ALKAMA, Maître de conférences à l'université de Bejaia, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à Mr. R. SAOU, maître de conférences à l'université de Bejaia, et Mr. A. GHERBI, maître de conférences à l'université de Sétif, d'avoir bien voulu mobiliser leur temps et leurs connaissances pour jurer ce travail.

Dedicaces


Je dédie ce modeste travail :

 *A mes très chers parents*

 *A mes frères et sœurs*

 *A toute la famille Ramli*

 *A tous mes amis*

 *A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant toutes mes années d'études*

SOMMAIRE

| | |
|----------------------------|---|
| Nomenclature | i |
| Liste des figures | v |
| Liste des tableaux | x |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre I : Généralités

| | |
|--|----|
| Introduction | 3 |
| 1. Situation énergétique mondiale | 3 |
| 2. Réserves finies et effet de serre | 3 |
| 3. Energies renouvelables | 4 |
| 4. Situation de l'énergie éolienne dans le monde | 4 |
| 5. Origine de l'énergie éolienne | 5 |
| 6. Propriétés de l'énergie éolienne | 5 |
| 7. Constitution d'un aérogénérateur et principe de conversion d'énergie | 6 |
| 8. Générateurs électriques | 8 |
| 8.1. Machine asynchrone à cage (fonctionnement à vitesse fixe) | 8 |
| 8.2. Machine asynchrone à rotor bobiné (fonctionnement vitesse variable) | 9 |
| 8.2.1. Variation de la résistance rotorique | 9 |
| 8.2.2. Génératrice asynchrone à double alimentation | 10 |
| 8.3. Machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants permanents | 11 |
| 9. Stockage d'Energie | 12 |
| 9.1. Stockage naturel de l'énergie | 12 |
| 9.2. Energie et puissance | 13 |
| 9.3. Différents types de stockage | 15 |
| 9.3.1. Stockage électrochimique | 15 |
| 9.3.1.1. Principes généraux et constitution | 16 |
| 9.3.1.2. Accumulateurs au plomb | 16 |
| 9.3.1.3. Accumulateurs au lithium | 17 |
| 9.3.1.4. Batteries Ni-Cd | 19 |
| 9.3.1.5. Batteries à circulation (Redox-Flow) | 20 |
| 9.3.2. Stockage mécanique | 20 |
| 9.3.2.1. Système inertiel de stockage d'énergie..... | 20 |
| 9.3.2.2. Stockage hydraulique (gravitaire) | 22 |
| 9.3.2.3. Stockage par air comprimé | 23 |

| | |
|--|----|
| 9.3.3. Stockage électromagnétique | 23 |
| 9.3.3.1. Super capacités (stockage électrostatique) | 23 |
| 9.3.3.2. Stockage magnétique dans les supra inductances (SMES) | 25 |
| 10. Hydrogène, vecteur énergétique de l'avenir | 26 |
| 10.1. Caractéristiques de l'hydrogène | 26 |
| 10.2. Complémentarité aux énergies renouvelables | 26 |
| 10.3. Production de l'hydrogène | 27 |
| 10.4. Production de l'électricité à partir de l'hydrogène | 27 |
| 11. Récapitulatif des systèmes de stockage | 28 |
| 11.1. Avantages et inconvénients | 28 |
| 11.2. Autres caractéristiques | 29 |
| Conclusion..... | 30 |

Chapitre II : Techniques de contrôle en puissance d'une turbine éolienne

| | |
|--|----|
| Introduction | 31 |
| 1. Modélisation de la turbine éolienne | 31 |
| 1.1. Caractéristiques des pales | 31 |
| 1.2. Rendement énergétique de la turbine éolienne..... | 33 |
| 1.3. Zones de fonctionnement | 35 |
| 2. Optimisation de la puissance captée par la turbine éolienne | 35 |
| 2.1. Méthode basée sur la mesure de la vitesse du vent | 37 |
| 2.2. Contrôle en puissance | 38 |
| 2.3. Méthode du gradient | 39 |
| 2.3.1. Algorithme de la méthode du gradient | 40 |
| 2.3.2. Résultats de simulation pour une turbine de 400 W | 41 |
| 2.4. MPPT par la logique floue | 42 |
| 2.4.1. Fuzzification des entrées | 42 |
| 2.4.2. Elaboration de la table des règles et processus d'inférence | 43 |
| 2.4.3. Défuzzification | 44 |
| 2.4.4. Résultats de simulation et interprétations | 45 |
| 3. Limitation de la puissance captée par la turbine éolienne..... | 46 |
| 3.1. Système Stall passif | 47 |
| 3.2. Système Stall actif | 48 |
| 3.3. Système Pitch actif | 48 |
| 4. Contrôle d'un SCEE basé sur la MSAP | 49 |

| | |
|---|----|
| 4.1. SCEE avec contrôle Stall | 49 |
| 4.2. SCEE avec limitation de puissance en zone stable | 51 |
| 4.3. SCEE avec contrôle Pitch | 52 |
| 4.3.1. Régulation de l'angle de calage par un correcteur PI | 52 |
| 4.3.1.1. Principe de la régulation | 52 |
| 4.3.1.2. Résultats de simulation et interprétations | 53 |
| 4.3.2. Régulation de l'angle de calage par la logique floue | 55 |
| 4.3.2.1. Structure de la régulation | 55 |
| 4.3.2.2. Bloc de contrôle par logique floue | 55 |
| 4.3.2.3. Résultats de simulation et interprétations | 57 |
| Conclusion..... | 58 |

Chapitre III : Etude de cas, aérogénérateur connecté au réseau électrique

| | |
|---|----|
| Introduction | 59 |
| 1. Description de la chaîne de production | 59 |
| 2. Modélisation du générateur synchrone en régime linéaire | 60 |
| 2.1. Equations initiales de la machine | 60 |
| 2.1.1. Equations des tensions | 61 |
| 2.1.2. Equations des flux magnétiques | 61 |
| 2.1.3. Equation mécanique | 62 |
| 2.2. Transformation de Park | 62 |
| 2.2.1. Matrice de Park et relations de passage | 62 |
| 2.2.2. Equations de la machine dans le repère de Park | 63 |
| 2.3. Modèle d'état de la machine synchrone à aimants permanents | 64 |
| 3. Stratégie de commande de la MSAP | 65 |
| 3.1. Principe de la commande | 65 |
| 3.2. Régulation des courants | 67 |
| 4. Modèle mathématique du convertisseur MLI | 67 |
| 5. Régulation de la tension du bus continu | 68 |
| 6. Commande de l'onduleur du côté réseau électrique | 69 |
| 6.1. Régulation des courants | 70 |
| 6.2. Calcul des courants de références | 72 |
| 7. Résultats de simulation et interprétations | 72 |
| 8. Commande purement électrique de la chaîne de conversion | 77 |

| | |
|---|----|
| 8.1. Principe de la commande | 77 |
| 8.2. Résultats de simulation et interprétations | 78 |
| Conclusion..... | 81 |

Chapitre IV : Etude de cas, aérogénérateur en fonctionnement autonome

| | |
|---|-----|
| Introduction | 82 |
| 1. Chaîne de conversion avec redresseur à diodes et une batterie..... | 82 |
| 2. Chaîne de conversion avec redresseur commandé..... | 83 |
| 3. Chaîne de conversion avec redresseur à diodes et un hacheur..... | 83 |
| 3.1. Optimisation de puissance du côté DC | 84 |
| 3.2. Limitation de puissance pour les vents forts | 86 |
| 4. Etude et commande du hacheur..... | 87 |
| 4.1. Fonctionnement du hacheur dévolteur | 87 |
| 4.2. Commande du hacheur | 89 |
| 4.3. Plage de fonctionnement | 90 |
| 5. Batterie | 91 |
| 6. Simulation de la chaîne de conversion..... | 92 |
| 7. Connexion d'une charge aux bornes de la batterie..... | 95 |
| 7.1. Gestion de la charge de la batterie | 95 |
| 7.2. Charge électrique | 96 |
| 7.3. Résultats de simulation et interprétations | 97 |
| Conclusion..... | 101 |
| Conclusion générale | 102 |
| Bibliographie..... | 104 |

Annexes

Annexe A : Principaux paramètres utilisés dans les systèmes étudiés

Annexe B : Notions de base sur la logique floue

Les principales abréviations et notations utilisées dans ce travail sont données dans ce qui suit, au fur et à mesure de leur apparition dans le texte.

ABREVIATIONS

GAS : Génératrice asynchrone

SCEE : Système de conversion d'énergie éolienne

IGBT : Transistor bipolaire à grille isolée (insolated gate bipolar transistor)

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents

MS : Machine synchrone

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

SISE : Système inertielle de stockage d'énergie

PAC : Pile à combustible

SMES : Superconducting magnetic energy storage

MPPT : Maximum power point tracking

CFO : Caractéristique du fonctionnement optimal

PO : Point optimal

LF : Logique floue

GN, MN, PN, Z, PP, MP, GP : Grand négatif, moyen négatif, petit négatif, zéro, petit positif, moyen positif et grand positif respectivement.

PI : Proportionnel- Intégral

DC : Courant continu (direct current)

NOTATIONS

CHAPITRE II :

β : Angle de calage des pales ($^{\circ}$)

α : Angle d'incidence ($^{\circ}$)

V_1 : Vitesse moyenne axiale d'écoulement des masses d'air en amont de la turbine (m/s)

V_2 : Vitesse moyenne axiale d'écoulement des masses d'air en aval de la turbine (m/s)

S : Surface balayée par les pales de la turbine (m^2)

ρ : Densité volumique de l'air (1.225 kg/m^3)

C_p : Coefficient de puissance

P_{t_max} : Puissance maximale extractible de l'énergie cinétique du vent (W)

C_{p_max} : Coefficient de puissance maximal

R : Rayon de la turbine (m)

λ : Vitesse spécifique
 Ω : Vitesse de rotation de la turbine et de la génératrice (rad/s)
 V_v : Vitesse de vent (m/s)
 C_t : Couple mécanique de la turbine (N.m)
 λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale
 Ω_{ref} : Vitesse mécanique de référence (rad/s)
 t : Temps (s)
 C_g : Couple électromagnétique de la génératrice (N.m)
 β_{ref} : Angle de calage de référence ($^\circ$)
 $\dot{\beta}$: Vitesse de variation de l'angle de calage des pales ($^\circ/s$)

CHAPITRE III :

$[V]_{abc}, [V]_{dq}$: Tensions statoriques de la MS dans le repère réel et de Park respectivement
 $[i]_{abc}, [i]_{dq}$: Courants statoriques de la MS dans le repère réel et de Park respectivement
 $[\Phi]_{abc}, [\Phi]_{dq}$: Flux magnétiques statoriques de la MS dans le repère initial et de Park respectivement
 v_f, i_f, Φ_f : Tension, courant et flux magnétique de l'enroulement d'excitation de la MS respectivement
 R_f : Résistance de l'enroulement d'excitation
 R_s : Résistance d'une phase statorique
 $[L_s]$: Matrice des inductances propres statoriques
 $[M_{sf}]$: Matrices des inductances mutuelles stator-rotor
 M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle stator-rotor
 Ω : Vitesse mécanique de la machine
 p : Nombre de paires de pôles de la MS
 θ : Position mécanique du rotor
 $P(\theta)$: Matrice de Park
 $[X]^t$: Transposée de la matrice $[X]$
 L_d, L_q : Inductances directe et quadratique de la MS
 M : Inductance magnétisante de la MS
 ω : Pulsation des grandeurs électriques
 $[i_m] = [i_{m1}, i_{m2}, i_{m3}]$: Courants statoriques de la MSAP

u_d, i_d : Tension et courant en amont du hacheur

α : Rapport cyclique du hacheur

L_{lis} : Inductance de lissage

$P_{dc}, u_{dc}, i_{dc}, C_{dc}$: Puissance, tension, courant et capacité du bus continu (en aval du hacheur) respectivement

i_{ond}, I_{ond}^* : Courant d'onduleur réel et de référence respectivement

I_d^*, I_q^* : Courants de références directe et quadratique, respectivement, de la MSAP

U_{dc}^* : Tension de référence du bus continu

F_1, F_2, F_3 : Fonctions de connexions du convertisseur statique

Δi : Bande d'hystérésis définie dans le régulateur à hystérésis

$[V_{ref}]$: Vecteur des tensions de références du côté réseau électrique

$v_{ond1}, v_{ond2}, v_{ond3}$: Tensions simples de l'onduleur (côté réseau)

v_{r1}, v_{r2}, v_{r3} : Tensions du réseau électrique

v_{rd}, v_{rq} : Tensions directe et quadratique du réseau électrique

i_{r1}, i_{r2}, i_{r3} : Courants envoyés au réseau électrique

i_{r1}^*, i_{r2}^* : Courants de références du réseau électrique

P_{res}^*, Q_{res}^* : Puissances active et réactive de références du côté réseau électrique

i_{rd}^*, i_{rq}^* : Courants direct et quadratique de références du côté réseau électrique

L_f, r_f : Inductance et résistance du filtre respectivement

P_{ms}, Q_{ms} : Puissances active et réactive de la MSAP

P_{res}, Q_{res} : Puissances active et réactive du côté du réseau électrique

CHAPITRE IV :

$P_{bat}, U_{bat}, i_{bat}, R_{bat}$: Puissance, tension, courant et résistance de la batterie respectivement

P_{bat_max} : Puissance maximale de la batterie

P_{opt} : Puissance optimale de la turbine éolienne

Ω_{opt} : Vitesse de rotation optimale

I_{bat_ref} : Courant de batterie de référence

E_{ab_max} : Force électromotrice composée maximale de la MSAP

Φ_{eff} : Valeur efficace du flux créer les aimants permanents

P_{ref_MPPT} : Puissance de référence obtenue par MPPT

i_D : Courant dans la diode

i_H : Courant à la sortie du hacheur

L_{lis} : Inductance de lissage

u_L : Tension aux bornes de l'inductance de lissage

α : Rapport cyclique du hacheur

$\alpha_{min}, \alpha_{max}$: Butées minimale et maximale du rapport cyclique

T_c, f_c : Période et fréquence de commutation du hacheur

$\Delta i_{bat}, \Delta i_{bat_max}$: Ondulation du courant de batterie et ondulation maximale respectivement

U_{dc_min}, U_{dc_max} : Tensions du bus continu minimale et maximale respectivement

$V_{v_min}, V_{v_max}, V_{v_moy}$: Vitesses de vent minimale et maximale et vitesse moyenne respectivement

V_{abc}, i_{abc} : Tensions et courants de la MSAP

$S_{a(i-1)}, S_{a(i)}$: Signal de commande de l'interrupteur en amont de la batterie (état antérieur et état actuel respectivement)

$S_{b(i-1)}, S_{b(i)}$: Signal de commande de l'interrupteur en aval de la batterie (état antérieur et état actuel respectivement)

$U_{bat_max}, U_{bat_min}, U_n$: Tension batterie maximale, minimale et nominale respectivement

P_{ch}, i_{ch} : Puissance et courant de la résistance de charge respectivement

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1: Puissance cumulée d’origine éolienne installée dans le monde depuis 1991 5

Figure I-2: Schéma d’ensemble d’une nacelle tripale 7

Figure I-3: Principe de la conversion d’énergie d’un aérogénérateur 7

Figure I-4: SCEE basé sur une génératrice asynchrone à cage (vitesse fixe) 8

Figure I-5: SCEE basé sur une génératrice asynchrone à cage à fréquence variable 9

Figure I-6: SCEE basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec variation de la résistance rotorique 10

Figure I-7: SCEE basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage électronique du glissement (fonctionnement à vitesse variable) 10

Figure I-8: Différentes configurations d’un SCEE basé sur une MSAP à attaque direct (fonctionnement à vitesse variable) 12

Figure I-9: Principaux vecteurs énergétiques actuels..... 13

Figure I-10: Diagramme de Ragone des condensateurs, des super condensateurs et des batteries électrochimiques 14

Figure I-11: Cellule élémentaire d’une batterie plomb-acide 17

Figure I-12: Principe de fonctionnement des batteries lithium 18

Figure I-13: Principe de fonctionnement d’une batterie Redox Flow au vanadium 20

Figure I-14: Système inertiel de stockage d’énergie 21

Figure I-15: Stockage gravitaire 22

Figure I-16: Principe de fonctionnement d’un système de stockage à air comprimé 23

Figure I-17: Différence entre un super condensateur et un condensateur classique 23

Figure I-18: Structure simplifié d’un super condensateur 24

Figure I-19: Schéma électrique simplifié d’un super condensateur 25

Figure I-20: Géométrie torique et solénoïde d’un SMES 26

Figure I-21: Production d’hydrogène par électrolyse de l’eau 27

Figure I-22: Structure de base d’une PAC. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons 28

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure II-1: Eléments caractéristiques d'une pale | 31 |
| Figure II-2: Direction du vent sur un tronçon d'une pale | 32 |
| Figure II-3: Ecoulement des masses d'air autour de la turbine éolienne | 33 |
| Figure II-4: Courbe typique de la puissance extraite par une turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent | 35 |
| Figure II-5: Caractéristiques de fonctionnement optimal d'une turbine éolienne | 36 |
| Figure II-6: Allure de performance d'une turbine éolienne | 36 |
| Figure II-7: Schéma bloc de simulation de la turbine éolienne | 37 |
| Figure II-8: MPPT en asservissement de vitesse d'une turbine de 400 W | 38 |
| Figure II-9: MPPT par la méthode du gradient | 40 |
| Figure II-10: Algorithme de la MPPT par la méthode du gradient | 40 |
| Figure II-11: Résultats de simulation de la méthode du gradient | 41 |
| Figure II-12: Schéma de principe pour l'optimisation de la puissance par la logique floue . | 42 |
| Figure II-13: Processus de fuzzification et détermination du degré d'appartenance | 43 |
| Figure II-14: Défuzzification par la méthode du centre de gravité | 45 |
| Figure II-15: Résultats de simulation par la logique floue : vitesse et puissance | 45 |
| Figure II-16: Résultats de simulation par la logique floue : Coefficient de puissance et vitesse spécifique | 46 |
| Figure II-17: Méthodes de limitation de puissance au niveau de la turbine | 47 |
| Figure II-18: Comparaison entre la technique Pitch et Stall passif | 47 |
| Figure II-19: Energie cinétique durant les phases d'accélération et de décélération de la turbine | 48 |
| Figure II-20: Caractéristique de fonctionnement d'un SCEE sur le plan couple-vitesse | 49 |
| Figure II-21: Evolution du point de fonctionnement depuis le démarrage jusqu'à la limitation de puissance par l'effet Stall | 50 |
| Figure II-22: Caractéristiques de fonctionnement d'une éolienne avec contrôle MPPT et Stall avec limitation de la vitesse | 51 |

| | |
|--|----|
| Figure II-23: Résultats de simulation d'une éolienne de 400 W avec limitation de puissance en zone stable | 52 |
| Figure II-24: Schéma bloc de régulation de l'angle de calage des pales | 53 |
| Figure II-25: Réponse de la boucle de régulation de l'angle de calage des pales | 53 |
| Figure II-26: Résultats de simulation d'une éolienne de 660 kW avec contrôle Pitch | 54 |
| Figure II-27: Régulation de l'angle de calage par logique floue | 55 |
| Figure II-28: Processus de fuzzification des entrées | 56 |
| Figure II-29: Allure de la vitesse du vent | 57 |
| Figure II-30: Résultats de simulation du contrôle Pitch par logique floue : vitesse de rotation et puissance de la turbine | 57 |
| Figure II-31: Résultats de simulation du contrôle Pitch par logique floue : Coefficient de puissance, vitesse spécifique et angle de calage | 58 |

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Figure III-1: Schéma du système étudié et la stratégie de sa commande | 60 |
| Figure III-2: Représentation symbolique de la machine synchrone | 61 |
| Figure III-3: Machine équivalente au sens de Park | 62 |
| Figure III-4: Diagramme vectoriel d'une phase statorique | 66 |
| Figure III-5: Principe de la commande du redresseur (côté machine) | 66 |
| Figure III-6: Régulation hystérésis des courants | 67 |
| Figure III-7: Schéma de principe du convertisseur statique | 67 |
| Figure III-8: Bus continu avec un hacheur survolteur | 68 |
| Figure III-9: Régulation de la tension du bus continu | 69 |
| Figure III-10: Commande de l'onduleur côté réseau électrique | 70 |
| Figure III-11: Régulation du courant envoyé réseau | 71 |
| Figure III-12: Allure de la vitesse du vent | 73 |
| Figure III-13: Coefficient de puissance, vitesse spécifique, angle de calage et vitesse mécanique de l'éolienne | 73 |
| Figure III-14: Courants, tensions et puissances de la MSAP | 74 |

| | |
|---|----|
| Figure III-15: Facteur de puissance côté machine | 74 |
| Figure III-16: Tension, courant et puissance du bus continu | 75 |
| Figure III-17: Tensions, courants et puissances du côté réseau électrique | 76 |
| Figure III-18: Bus continu avec un hacheur survolteur-dévolteur | 77 |
| Figure III-19: Allure de la vitesse du vent | 78 |
| Figure III-20: Coefficient de puissance et vitesse spécifique | 78 |
| Figure III-21: Vitesse de rotation, couple électromagnétique, tension, courant et puissance de la MSAP | 79 |
| Figure III-22: Facteur de puissance de la MSAP | 80 |
| Figure III-23: Tension, courant et puissance du bus continu | 80 |

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| Figure IV-1: Chaîne de conversion utilisant un redresseur à diodes | 82 |
| Figure IV-2: Chaîne de conversion utilisant un redresseur commandé | 83 |
| Figure IV-3: Chaîne de conversion avec un redresseur à diode et un hacheur | 84 |
| Figure IV-4: Structure du dispositif MPPT en utilisant la tension du bus continu | 86 |
| Figure IV-5: Modes de limitation de puissance de la chaîne éolienne | 86 |
| Figure IV-6: Limitation de puissance en cas de forts vents | 87 |
| Figure IV-7: Montage d'un hacheur dévolteur débitant sur une batterie..... | 88 |
| Figure IV-8: Courbes caractéristiques du fonctionnement du hacheur..... | 89 |
| Figure IV-9: Schéma complet de la boucle de régulation du courant dans la batterie..... | 89 |
| Figure IV-10: Schéma simplifié de la régulation du courant dans la batterie..... | 89 |
| Figure IV-11: Schéma simplifié d'une batterie..... | 91 |
| Figure IV-12: Charge et décharge de la batterie | 92 |
| Figure IV-13: Profil du vent et vitesses de rotation (réelle et calculée par LF) | 93 |
| Figure IV-14: Tensions et courants en amont et en aval du redresseur à diodes | 93 |
| Figure IV-15: Tension et courant d'une phase de la machine..... | 93 |
| Figure IV-16: Courants et puissance du côté DC..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figure IV-17: Tension et puissance de la batterie | 94 |
| Figure IV-18: Gestion de la charge dans la batterie | 95 |
| Figure IV-19: Surveillance de l'état de charge de la batterie | 95 |
| Figure IV-20: Charge connectée aux bornes de la batterie | 96 |
| Figure IV-21: Allures de la vitesse du vent utilisées en simulation | 97 |
| Figure IV-22: Tension à l'entrée du hacheur et aux bornes de la batterie : cas du vent faible | 97 |
| Figure IV-23: Courants et puissances en aval du redresseur à diodes : cas du vent faible | 98 |
| Figure IV-24: Tension à l'entrée du hacheur et aux bornes de la batterie : cas du vent moyen | 99 |
| Figure IV-25: Courants et puissances en aval du redresseur à diodes : cas du vent moyen .. | 99 |
| Figure IV-26: Tension à l'entrée du hacheur et aux bornes de la batterie : cas du fort vent | 100 |
| Figure IV-27: Courants et puissances en aval du redresseur à diodes : cas du fort vent | 100 |

Liste des tableaux

Chapitre I

| | |
|--|-------|
| Tableau I-1: Exemples de densités énergétiques de quelques moyens de stockage | 14 |
| Tableau I-2: Classification des technologies de stockage selon les phénomènes qui sont à la base de leur fonctionnement | 15 |
| Tableau I-3: Comparaison des technologies de stockage | 28-29 |
| Tableau I-4: Caractéristiques des moyens de stockage à petite échelle..... | 29 |
| Tableau I-5: Caractéristiques des moyens de stockage à grande échelle..... | 30 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Tableau II-1: Les commandes à effectuer | 40 |
| Tableau II-2: Règles d'inférences | 44 |
| Tableau II-3: Sortie du circuit logique | 55 |
| Tableau II-4: Règles d'inférences | 56 |

Chapitre IV

| | |
|---|----|
| Tableau IV-1: Plage de fonctionnement du système éolien selon la tension batterie..... | 91 |
| Tableau IV-2: Commande des interrupteurs en amont et en aval de la batterie | 96 |

INTRODUCTION GENERALE

La brûlure du soleil, la chaleur de la terre, l'ardeur du vent, la puissance de l'eau, la générosité des plantes, autant d'énergies infinies ou sans cesse régénérées qui cristallisent tous nos espoirs. L'engouement pour les énergies renouvelables est tel un vent frais de créativité semble inspirer, tous azimuts, la recherche publique et privée. Solaire thermique, photovoltaïque, géothermie, éolien, hydroélectricité, exploitation de la biomasse : les idées foisonnent encore dans les laboratoires [Let08].

De petites turbines de quelques dizaines de Watt en sites isolés aux grandes turbines de plusieurs MW en sites offshore raccordées au réseau électrique, la filière éolienne n'a pas encore dit son dernier mot et les performances des aérogénérateurs sont en permanente évolution profitant des dernières avancées technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance, des machines électriques et des matériaux de construction. Dans ce contexte, notre travail s'intéresse aux aérogénérateurs basés sur la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

En effet, la MSAP est devenue une solution concurrente à la MADA, dans un fonctionnement à vitesse variable, pour les grandes puissances, en plus de sa large utilisation pour les faibles et moyennes puissances [Mul99, Bar07]. La MSAP possède de bonnes performances avec des dimensions réduites et permet un fonctionnement aux faibles vitesses, ce qui offre la possibilité de supprimer le multiplicateur de vitesse. Néanmoins, l'optimisation du fonctionnement à vitesse variable du système éolien impose l'amélioration des techniques d'extraction et de limitation de la puissance captée par la turbine éolienne. Cet aspect est abordé en détail dans ce présent travail.

Un état de l'art de l'énergie éolienne est abordé dans le premier chapitre. Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production d'électricité d'origine éolienne dans le monde. Plusieurs architectures d'aérogénérateurs existantes sont présentées. Elles se distinguent principalement par les machines électriques utilisées et les convertisseurs d'électronique de puissance associés. Cette partie décrit également les différentes techniques de stockage d'énergie rencontrées dans la littérature : électrochimiques, mécaniques et électromagnétiques.

Le second chapitre est dédié à l'étude du fonctionnement de la turbine éolienne (à axe horizontale). Deux cas de fonctionnement essentiels sont étudiés : optimisation de puissance

pour des vitesses de vent inférieures à la vitesse nominale de la turbine et limitation de puissance pour des vitesses supérieures. Les techniques d'optimisation décrites dans cette section admettent que la caractéristique de la turbine soit inconnue : alors deux méthodes sont développées afin d'optimiser la puissance captée par la turbine, il s'agit de la méthode du gradient et de la logique floue. La limitation de puissance pour les vents forts peut se concrétiser par plusieurs méthodes présentées également dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une MSAP et raccordée au réseau électrique. La turbine éolienne permet un fonctionnement pour des vitesses de vent dépassant sa vitesse nominale par variation de l'angle de calage des pales (contrôle Pitch par logique floue) ou sans variation de l'angle de calage (en agissant uniquement sur la commande de la génératrice). La génératrice synchrone à grand nombre de pôles est pilotée vectoriellement en couple. Des résultats de simulation sous Matlab sont présentés.

Le dernier chapitre traite le cas du fonctionnement autonome de l'aérogénérateur de faible puissance. La chaîne de conversion est composée d'une turbine éolienne, d'une MSAP à grand nombre de pôles, d'un redresseur à diodes, d'un hacheur et d'une batterie de stockage. L'optimisation et la limitation de puissance sont mise en œuvre du côté continu (optimisation et limitation indirecte de puissance) à travers le contrôle du courant à la sortie du hacheur. Avec la présence d'une charge connectée aux bornes de la batterie, le régulateur de charge\ décharge de la batterie assure sa protection contre les décharges profondes et les surcharges excessives.

Finalement, ce travail est clôturé par une conclusion générale et les perspectives envisagées à la lumière de ce mémoire.

CHAPITRE I :**GENERALITES****Introduction**

Ce chapitre aborde en premier lieu le contexte énergétique mondial actuel et les raisons incitantes au développement des énergies renouvelables à court terme. Notre intérêt est porté sur la filière éolienne dont les potentialités sont considérables et son exploitation dans le monde ne cesse d'augmenter chaque année. Des aérogénérateurs de différentes technologies sont en permanente évolution afin d'améliorer le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie produite. A cet effet, les structures les plus couramment utilisées, les machines électriques employées et l'électronique de puissance associée sont décrits. En second lieu, différentes techniques de stockage d'énergie sont présentées, à savoir, le stockage électrochimique, électromagnétique et mécanique. Chaque technique de stockage est décrite brièvement et des tableaux comparatifs sont dressés à la fin du chapitre.

1. Situation énergétique mondiale

La consommation énergétique ne peut que croître, pour deux raisons : l'une est l'accroissement accéléré de la population, qui devrait atteindre huit milliards d'individus en 2050, l'autre réside dans le fait que les pays en développement ne peuvent élever leur niveau de vie qu'en augmentant notablement leur consommation énergétique. Cela laisse supposer une demande fortement croissante en énergie électrique dans les prochaines années [Mir05, Ngo05].

2. Réserves finies et effet de serre

L'utilisation massive des énergies fossiles expose la planète à deux problèmes majeurs [Cam03, Mir05, Ngo05]:

- Epuisement des réserves à longs termes ;
- Accroissement de l'effet de serre à courts termes.

L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la terre et se transforme en rayons infrarouge. Des gaz présent dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons, comme les vitres d'une serre ; d'où le nom donné à ce mécanisme, qui tendent à la réchauffer, ce qui a un effet bénéfique pour la terre. Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz qui augmentent artificiellement l'effet de serre. Par conséquent, le climat a subi de fortes perturbations et la pollution atmosphérique a atteint des niveaux critiques.

Les principaux gaz à effet de serre sont [Cam03, Ngo05]:

- Le gaz carbonique (CO₂) ;
- Méthane ;
- Les Halocarbures (Chlorofluorocarbures CFC, Hydrochlorofluorocarbures HCFC et Hydrofluorocarbures HFC) ;
- Dioxyde d'azote.

L'avenir de la filière nucléaire n'est pas assuré aussi bien que son avènement ne l'est. Les déchets nucléaires radioactifs et le démantèlement prochain des vieilles centrales posent de sérieux problèmes d'ordre sécuritaire et environnemental [Mir05]. Face à ce double enjeu (épuisement des ressources fossiles et le respect de l'environnement) de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables.

3. Energies renouvelables

Il existe plusieurs ressources en énergie renouvelable : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie des vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources naturelles en énergies sont pratiquement inépuisables et propres. Dans ce travail on s'intéresse plus particulièrement à l'énergie éolienne.

4. Situation de l'énergie éolienne dans le monde

Durant l'année 2008, 27.1 GW d'énergie électrique d'origine éolienne ont été installés dans le monde, élevant ainsi sa contribution à 121 GW (depuis 1991 à 2008, figure (I-1)). Le marché annuel de cette filière a enregistré une augmentation de 37 % en 2008 contre 31 % en 2007 et 2006 et 40 % en 2005. Par rapport à l'année 2004, où 8.4 GW sont installés, la capacité annuelle a plus que triplé à la fin 2008 (27.1 GW). Au total, la puissance cumulée a augmenté de 48 GW en 2004 à 121 GW en 2008 [EWEA09].

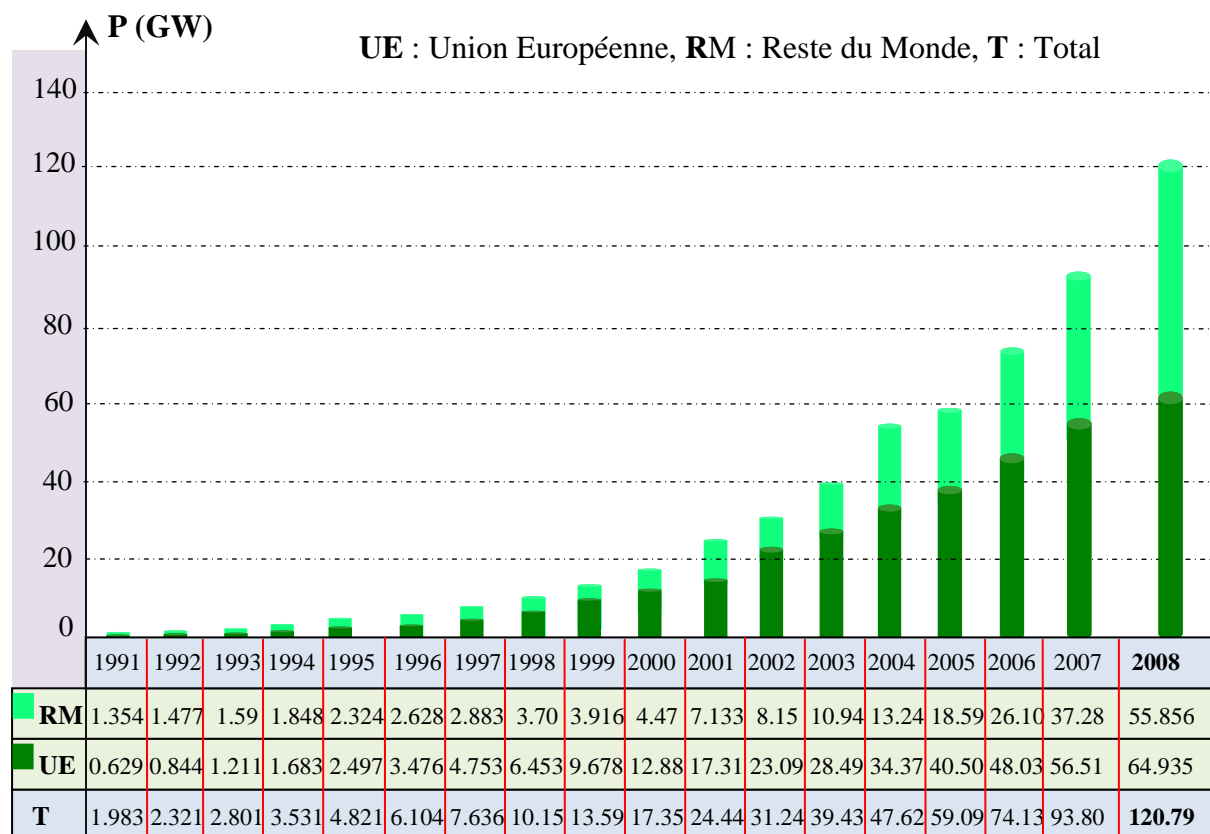


Figure I-1: Puissance cumulée d'origine éolienne installée dans le monde depuis 1991

5. Origine de l'énergie éolienne

La ressource éolienne ou plutôt le vent provient du développement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [Lav05].

6. Propriétés de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne qui est en plein développement doit sa croissance à plusieurs facteurs d'ordre scientifique et technique qui ont contribué et contribuent encore à son essor [Lav05, Cam03] :

- L'énergie éolienne est propre ;
- C'est une énergie abondante ;
- Elle est prometteuse : actuellement elle est la moins chère de toutes les énergies renouvelables après l'énergie hydraulique ;

- C'est la ressource renouvelable la plus fiable vue sa disponibilité matérielle élevée ;
- L'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emploi au niveau de la fabrication et de l'installation.

Cependant, en raison du caractère très fluctuant et aléatoire du vent, cette ressource en énergie est fortement variable ce qui freine sa participation aux services systèmes (réglage de la tension, de la fréquence, démarrage en autonome, possibilité de fonctionner en ilotage, etc.). D'autres désavantages de l'éolien sont liés à l'impact visuel, l'impact sur les oiseaux et le bruit acoustique [Cam03].

Afin d'assurer l'équilibre production /consommation, il faut ajouter des systèmes de stockage d'énergie permettant d'avoir une réserve supplémentaire d'énergie et de contribuer à améliorer les services systèmes [Cim05].

7. Constitution d'un aérogénérateur et principe de conversion d'énergie

Les turbines éoliennes peuvent être à axe vertical ou à axe horizontal, les turbines à axe horizontale (qui sont les plus utilisées actuellement) sont unipale, bipales ou tripales. Les éoliennes tripales sont les plus répandues dans l'industrie en raison du meilleur compromis qu'elles réalisent entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation [Poi03]. Les principaux éléments constituant un aérogénérateur tripales sont mentionnés sur la figure (I-2).

Les aérogénérateurs permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- ❖ Au niveau de la turbine, qui extrait, à l'aide des pales, une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique disponible sur le rotor ;
- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique du rotor de la turbine et la convertie en énergie électrique, transmise par la suite au réseau électrique ou à une charge isolée.

La figure (I-3) représente la chaîne de conversion d'énergie au niveau de l'aérogénérateur.

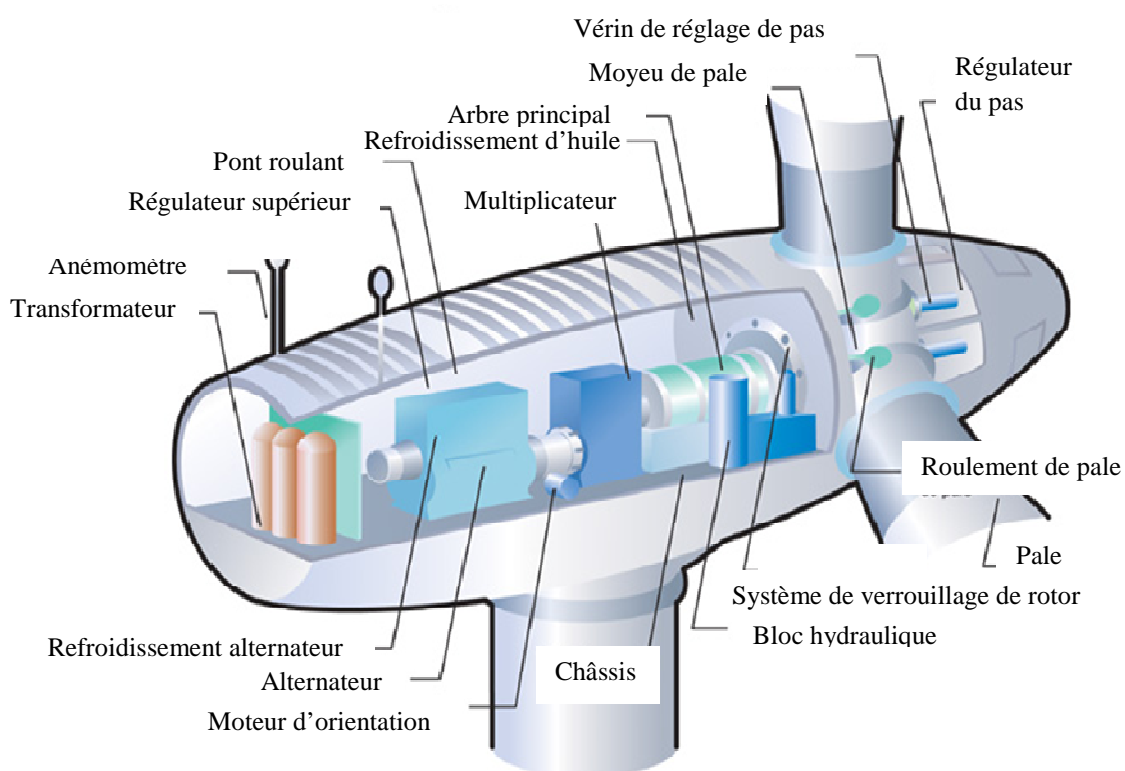


Figure I-2: Schéma d'ensemble d'une nacelle tri-pale

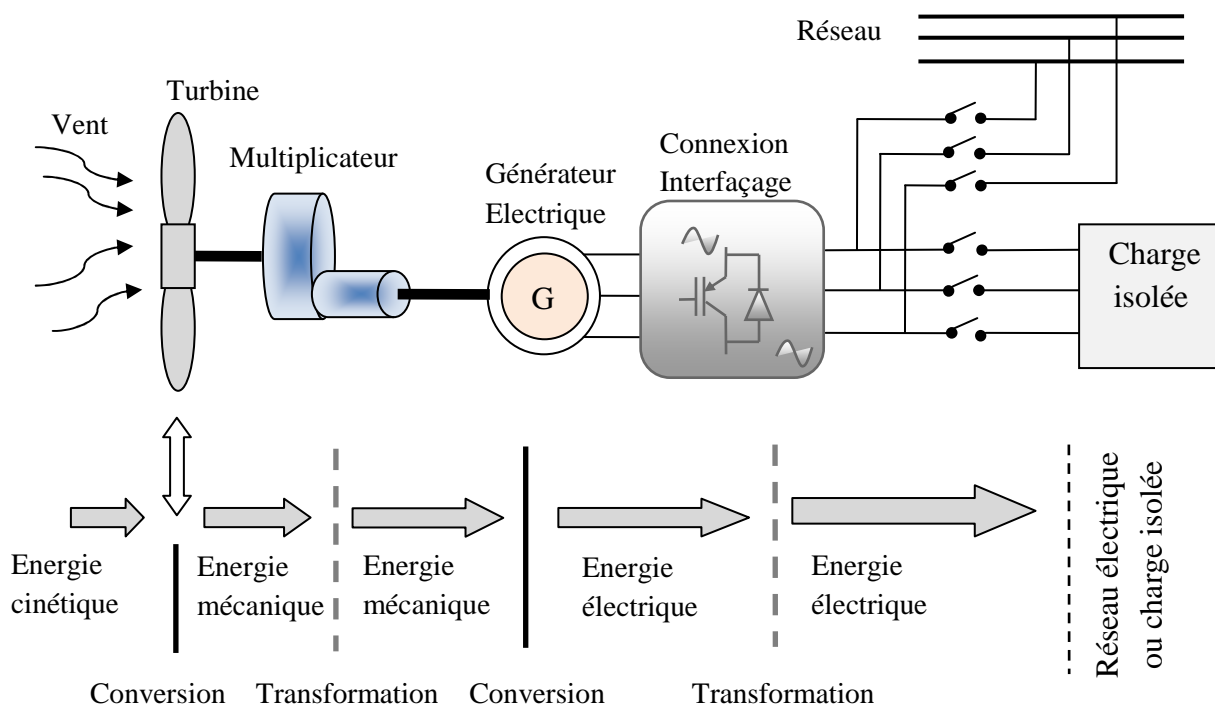


Figure I-3: Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur

8. Générateurs électriques

Les machines principalement utilisées sont : les machines asynchrones (à cage ou à rotor bobiné) et les machines synchrones (excitation par aimants permanents ou par un bobinage alimenté en courant continu). Différentes combinaisons entre machines électriques et convertisseurs statiques ont conduit à la conception de plusieurs configurations d'aérogénérateurs par les principaux constructeurs au monde (Enercon, Vestas, Gamesa, Nordex, etc.). Ces concepts sont décrits et étudiés largement dans la littérature. [Aim04, Bar07, Cam03, Han01, Mir05, Mun08].

8.1. Machine asynchrone à cage (fonctionnement à vitesse fixe)

La machine asynchrone à cage est fiable, robuste simple à fabriquer, et assez bon marché. Elle occupe une place intéressante dans la conversion d'énergie éolienne [Poi03]. Sa vitesse mécanique est imposée par la fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles dont elle dispose. Le multiplicateur de vitesse à rapport élevé est généralement indispensable. Cependant, l'augmentation du nombre de pôles permet de diminuer la vitesse nominale de la machine mais cela affecte le rendement et le facteur de puissance ainsi que l'augmentation de la masse et du coût de la machine [Mul04].

Le fonctionnement de la machine asynchrone à cage nécessite un apport de puissance réactive. Dans le cas où la machine est connectée au réseau électrique de distribution ou dans un fonctionnement en site isolé, cette puissance est fournie par des condensateurs disposés en parallèle avec l'enroulement statorique [Poi03].

Dans le cas du raccordement direct sur le réseau (fonctionnement en régime normal sans interface d'électronique de puissance), un gradateur permet d'éviter les régimes transitoires perturbateurs du réseau par une mise progressive sous tension de l'enroulement statorique et lorsque le régime permanent est atteint, le gradateur est mis hors circuit, figure (I-4) [Mul04].

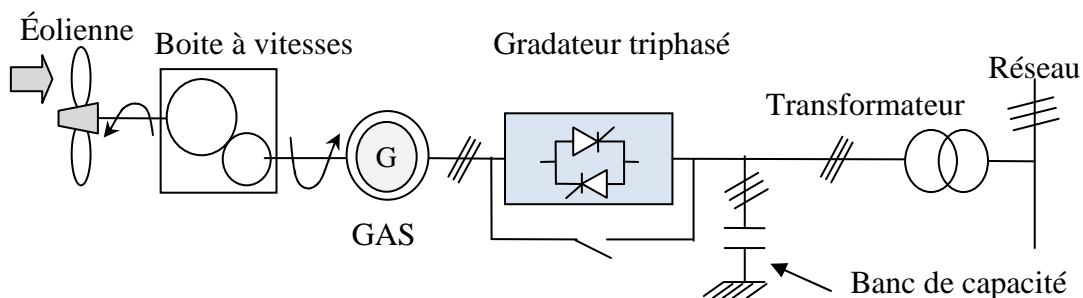


Figure I-4: SCEE basé sur une génératrice asynchrone à cage (vitesse fixe)

Cette structure est souvent associée au contrôle au niveau de la turbine du type passif Stall, ce type de contrôle est bien adapté aux vitesses fixes [Mul04].

L'utilisation d'un variateur de fréquence, dimensionné pour la pleine puissance convertie par la machine ajoutée à la puissance réactive de magnétisation, permet un réglage de la vitesse. Mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence et multiplicateur de vitesse, figure (I-5)) [Poi03].

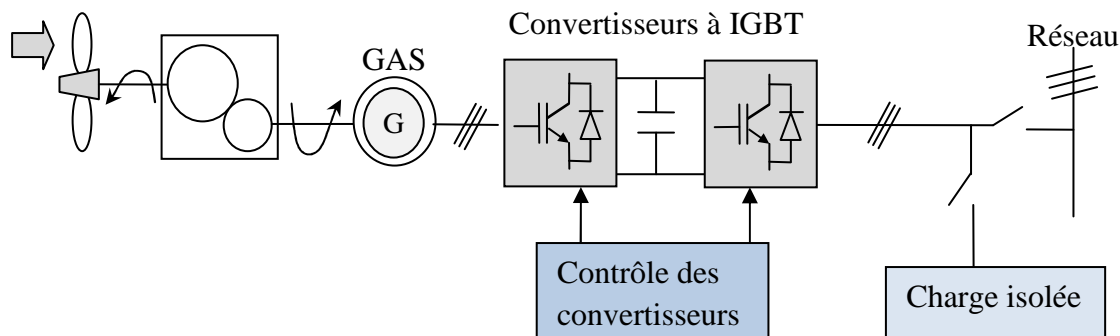


Figure I-5: SCEE basé sur une génératrice asynchrone à cage à fréquence variable

8.2. Machine asynchrone à rotor bobiné (fonctionnement vitesse variable)

La machine asynchrone à rotor bobiné permet d'exploiter des convertisseurs d'électronique de puissance dimensionnés pour des puissances réduites. Son inconvénient est lié à la maintenance exigée par ses contacts glissants (balais-bagues).

8.2.1. Variation de la résistance rotorique

A l'aide de résistances disposées en série avec les enroulements rotoriques, une interface d'électronique de puissance (redresseur à diode et un hacheur à transistor permet la variation du glissement et donc une variation de la vitesse d'environ 10 % (diminution), figure (I-6) [Mul04, Poi03].

Ce procédé augmente sensiblement l'énergie captée et réduit l'influence des oscillations de puissance dues aux fluctuations du vent. Cependant ce procédé est considéré comme une simple amélioration par rapport à la structure utilisant la machine à cage à vitesse fixe et non pas une solution réelle de variation de vitesse [Mul04].

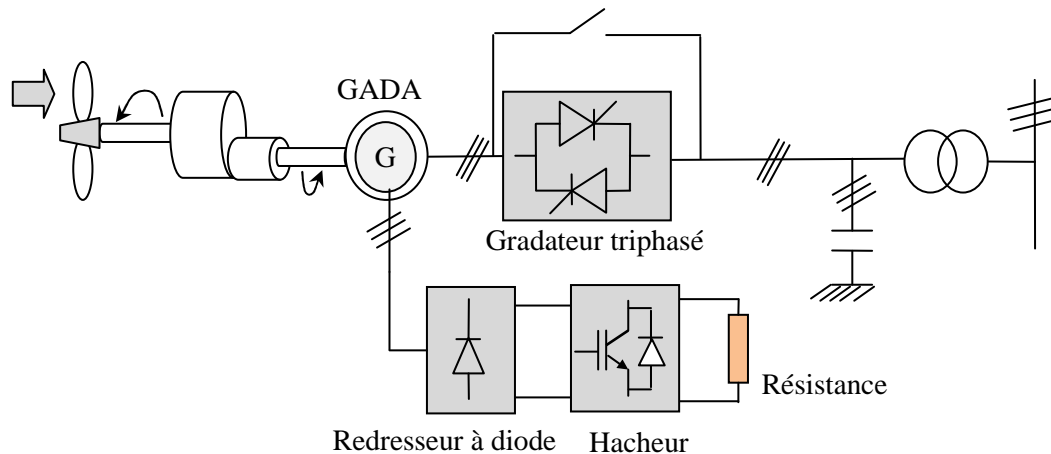


Figure I-6: SCEE basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec variation de la résistance rotorique

Le raccordement au réseau est identique à celui du système à vitesse fixe utilisant la génératrice asynchrone à cage.

8.2.2. Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

Une autre solution intéressante pour cette machine consiste à lier directement le stator de la génératrice au réseau de distribution, alors que son rotor est couplé au stator (cascade) à travers deux convertisseurs MLI (figure I-7). L'avantage principal de cette structure réside dans le fait que les convertisseurs sont dimensionnés pour une fraction de la puissance totale (20-30%). Cela signifie que les pertes dans les convertisseurs, ainsi que leur coût, sont diminués [Aou09].

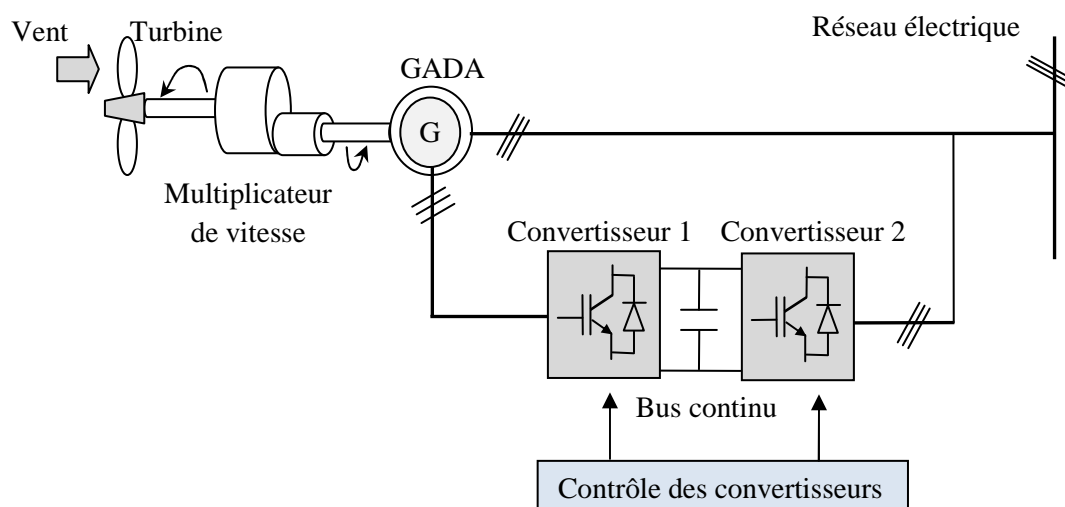


Figure I-7: SCEE basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage électronique du glissement (fonctionnement à vitesse variable)

8.3. Machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants permanents (MSAP)

La machine synchrone peut être à inducteur bobiné ou à excitation par aimants permanents. Les deux structures associées à la production éolienne exploitent des interfaces d'électronique de puissance pour le raccordement au réseau ou pour le fonctionnement autonome [San08]. Elle est considérée comme une solution concurrente à la GADA, en raison des nombreux avantages qu'elle possède [Mul04]:

- ✓ Suppression du multiplicateur de vitesse ou réduction considérable de sa taille;
- ✓ Vitesse variable à 100 % ;
- ✓ Puissance massique importante (cas de la MSAP);
- ✓ Réglage du circuit d'excitation (MS à rotor bobiné), ce qui procure un moyen supplémentaire de contrôle,
- ✓ Couplage rigide au réseau de distribution via un convertisseur.

Cependant, quelques contraintes limitent l'utilisation de la MS à inducteur bobiné :

- ✓ Entretien des contacts glissants (balais-bagues) ;
- ✓ Nécessité d'une alimentation auxiliaire en continu pour le circuit d'excitation ;
- ✓ Le surcoût engendré par le dimensionnement du convertisseur de puissance pour la totalité de la puissance produite.

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type, à grand nombre de pôles, permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. [Mir05, Mul99].

Les principales configurations basées sur la machine synchrone à aimants permanents sont schématisées sur la figure (I-8).

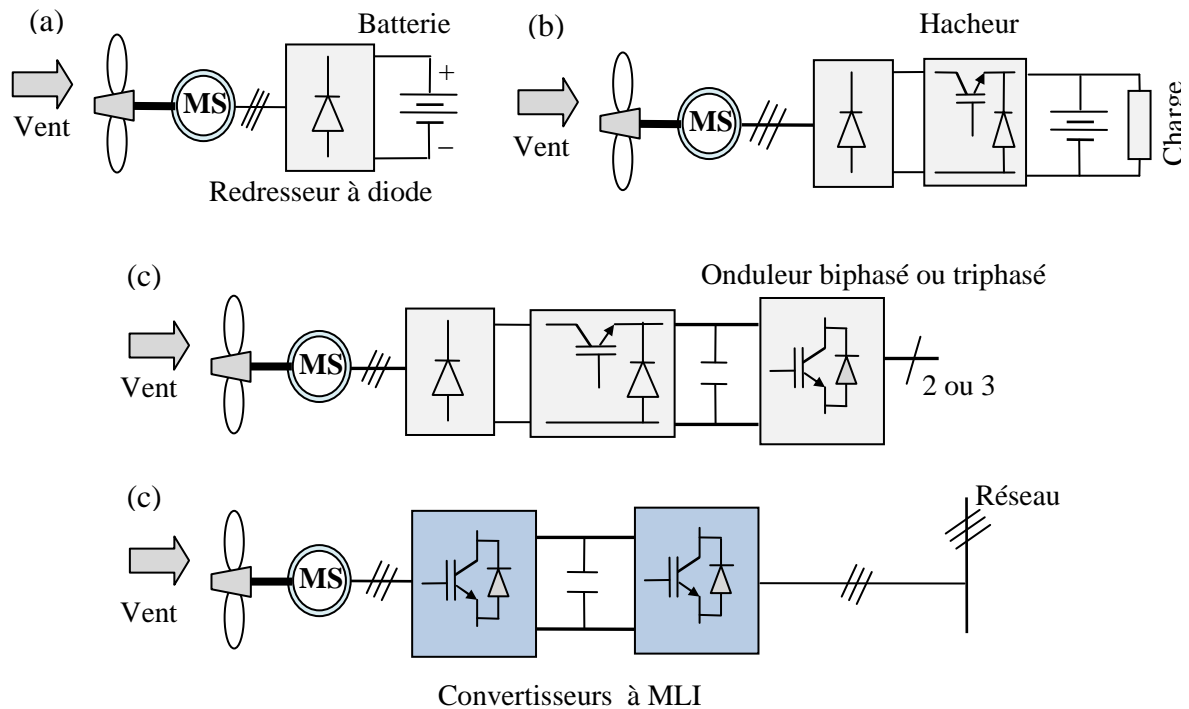


Figure I-8: Différentes configurations d'un SCIEE basé sur une MSAP à attaque direct (fonctionnement à vitesse variable)

9. Stockage d'Énergie

Le stockage, d'une manière générale et plus particulièrement celui de l'électricité, a toujours été le point faible de l'énergie. Cependant, il constitue un point clé pour l'essor des énergies renouvelables. Indispensable quand la source d'énergie et l'utilisateur sont isolés, le stockage l'est aussi quand cette source est reliée au réseau électrique. De ce fait, le stockage énergétique paraît comme une solution immédiate pour faire face à la production irrégulière des sources renouvelables, liée à leur nature répartie [Mar05a].

9.1. Stockage naturel de l'énergie

L'énergie exploitable est stockée, avant tout, dans la nature sous des formes et avec des densités très diverses [Jea07]:

- Stockage fossile, dans les couches géologiques terrestre ;
- Stockage gravitaire, en utilisant l'eau par exemple ;
- Stockage biochimique, pour la biomasse ;
- Stockage thermique, pour le soleil qui traduit aussi ses effets dans le vent ou l'énergie des mers.

Pour la majorité de ses formes de stockage qualifiées de primaires, l'homme, en exploitant ces énergies, ne paye que les frais de déstockage.

Le schéma de la figure (I-9) donne les principaux vecteurs de l'énergie et leur chaîne de conversion et de stockage depuis les sources primaires jusqu'à l'utilisation finale.

Dans la chaîne énergétique, le stockage peut être mis en œuvre dans chacune de ces étapes. Le problème de stockage revêt une acuité particulière dans le domaine des réseaux électriques puisqu'il faut assurer l'équilibre entre la puissance fournie et la puissance consommée.

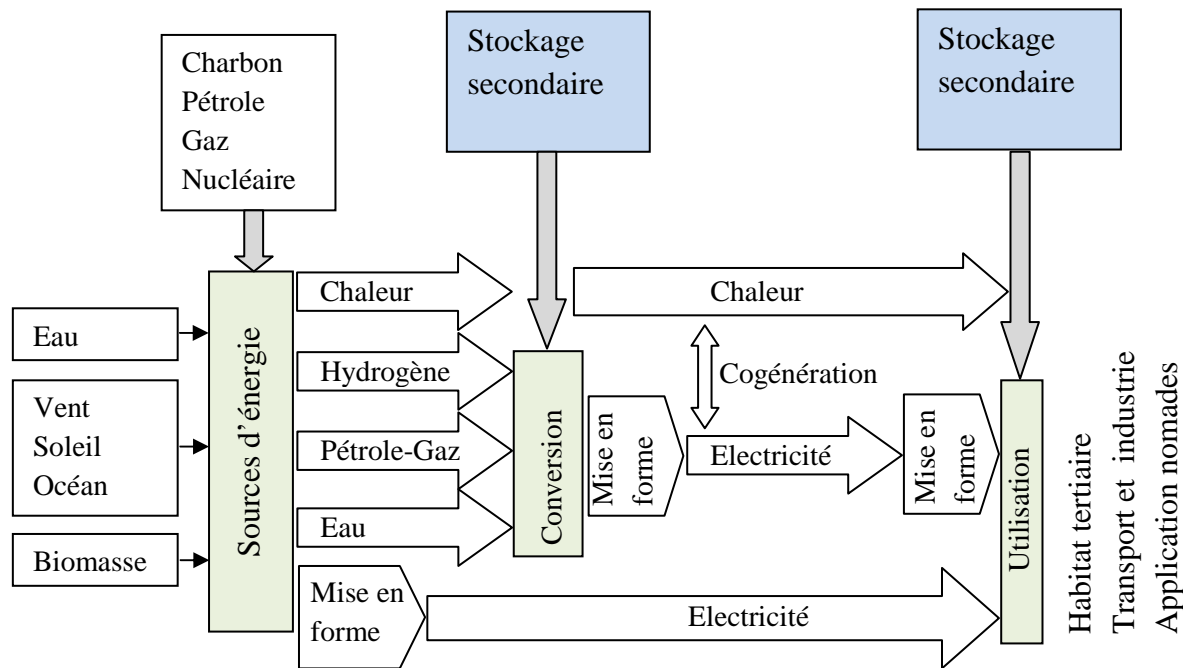


Figure I-9: Principaux vecteurs énergétiques actuels [Jea07]

Suivant les applications visées, plusieurs paramètres technico-économiques (coût d'investissement, densité d'énergie, ou de puissance, cyclabilité, impact sur l'environnement, etc.) vont conduire au choix de la technologie de stockage la mieux adaptée pour une application donnée.

9.2. Energie et puissance

L'énergie massique en Wh/kg ou volumique en Wh/l et la puissance massique en W/kg permettent de quantifier les performances d'un système de stockage. Le diagramme de Ragone de la figure (I-10) permet de représenter avec des échelles logarithmiques, la puissance massique en fonction de l'énergie massique. On peut ainsi comparer les

performances des super condensateurs, des batteries d'accumulateurs et des condensateurs traditionnels [Via08].

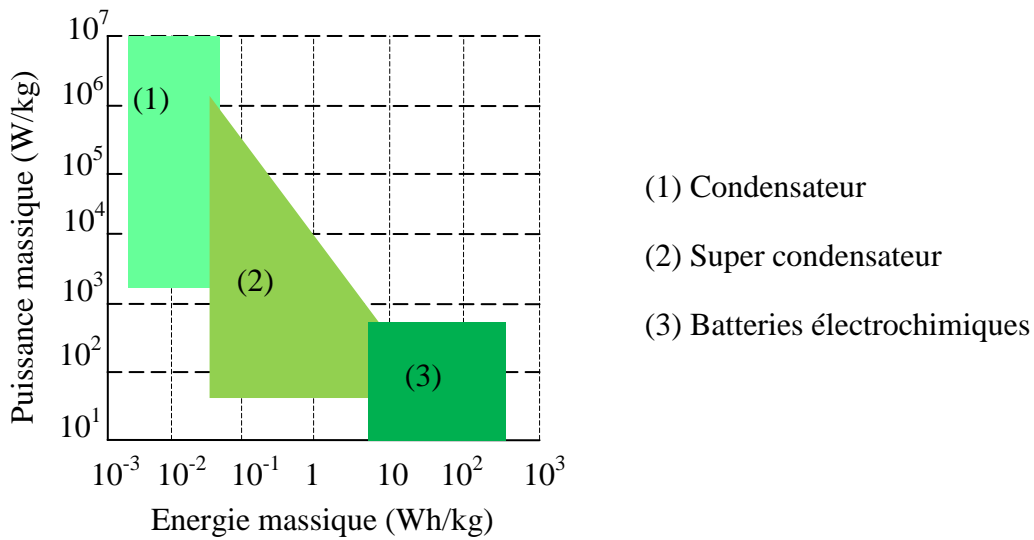


Figure I-10 : Diagramme de Ragone des condensateurs, des super condensateurs et des batteries électrochimiques

Les densités d'énergie stockées dans les matériaux ou les composants de stockage sont très différentes. Le tableau (I-1) donne quelques exemples des densités énergétiques exprimées en Wh/kg. Ces données montrent l'énorme avantage des sources fossiles sur les sources secondaires de stockage [Jea07].

Tableau I-1: Exemples de densités énergétiques de quelques moyens de stockage

| Moyen de stockage | H ₂ | Charbon | Bois | Batterie Zn-air | Batterie Li-ion | Batterie alcaline | Air comprimé | Batterie Pb-acide |
|---------------------------|----------------|---------|-------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|-------------------|
| Densité d'énergie (Wh/kg) | 31 000 | 11 500 | 2 800 | 480 | 330 | 164 | 34 | 25 |

Le choix d'une batterie de stockage pour une application donnée nécessite le respect de certains critères comme la tension, la durée de vie, la maintenance, la température, l'autodécharge, la caractéristique de charge, la cyclabilité, la sécurité d'exploitation, les dimensions physique, le prix et la recyclabilité (contrainte environnementale).

D'une manière générale, une technologie de stockage doit assurer un meilleur compromis en termes de coût, de fiabilité et de rendement du système.

9.3. Différents types de stockage

Les technologies de stockage utilisent des principes physiques ou chimiques différents. On peut classer celles-ci en fonction des phénomènes physico-chimique qu'elles font intervenir (tableau I-2) [Jea07, Rys08].

Tableau I-2: Classification des technologies de stockage selon les phénomènes qui sont à la base de leur fonctionnement

| Origine de l'énergie stockée | Technologies |
|------------------------------|--|
| Electrochimique | Batteries Hydrogène/PAC (pile à combustible) |
| Mécanique | Hydraulique, Volant d'inertie, Aire comprimé, Ressort. |
| Electromagnétique | Capacité/super capacité Inductance/Stockage magnétique |
| Thermique | Energie sensible : eau, masse thermiques Chaleur latente : sels fondus avec changement de phase |

9.3.1. Stockage électrochimique

Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie sous forme chimique. Cette énergie est générée par des réactions électrochimiques activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte. L'énergie stockée est restituée sous forme électrique dans un circuit extérieur.

L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible, il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme batterie est utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires rechargeables [Mar05a].

Un accumulateur, quelle que soit sa technologie, est caractérisé par trois grandeurs essentielles : sa densité d'énergie, sa densité de puissance et sa cyclabilité [Mar05a]:

- **Densité d'énergie massique ou volumique** : elle correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (en Wh/kg) ou de volume (Wh/l) d'accumulateur.

- **Densité de puissance massique** : elle représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur (en W/kg), c'est l'énergie fournie par unité de temps et par unité de masse.
- **Cyclabilité** : elle est exprimée en nombre de cycles (correspondant à une charge et une décharge, elle caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale.

9.3.1.1. Principes généraux et constitution

Les accumulateurs électrochimiques sont basés sur les réactions chimiques d'oxydoréduction.

Ils sont composés de trois éléments principaux :

- ✚ Anode : électrode négative (réductrice) métallique ; elle fournit des électrons au circuit extérieur.
- ✚ Cathode : électrode positive (oxydante), en générale en oxyde métallique ; elle reçoit les électrons du circuit extérieur.
- ✚ Electrolyte : c'est une solution aqueuse siège des réactions électrochimiques, il joue le rôle d'un conducteur ionique.

On trouve aussi parfois une membrane séparatrice entre les électrodes.

Le rôle de la température dans les réactions chimiques est déterminant. En effet, ces accumulateurs ne fonctionnent pas de façon optimale à basse température voire à température ambiante et la montée en température favorise la conduction ionique et pénalise la conduction électronique. Cela mène à un compromis à considérer avec la valorisation éventuelle de la chaleur dans le système [Sai04].

Le choix de l'électrolyte détermine, par sa conductivité, la gamme de température de fonctionnement. Son état (liquide ou solide) affecte la sûreté du système. En d'autres termes, sécurité et performances sont les principales exigences auxquelles doivent répondre les électrolytes de la batterie [Mar05b].

9.3.1.2. Accumulateurs au plomb

Les batteries au plomb restent actuellement les plus répondues dans l'automobile et pour des applications stationnaires; leur technologie est bien maîtrisée, néanmoins on cherche toujours à améliorer leur durée de vie qui constitue leur majeur inconvénient. Elles présentent

l'avantage non négligeable d'avoir le prix de revient le plus faible parmi tous les types de batteries connues. Son utilisation s'étend aux installations de plusieurs MWh [Dil04, Jea07, Sai04, Zho08].

a) Principe de fonctionnement

Il se produit au cours de la décharge, une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode (figure I-11). Ces réactions sont inversées lors de la recharge.

Ces batteries, comme toutes les batteries à électrolyte liquide, nécessite un entretien régulier (remise à zéro de l'électrolyte).

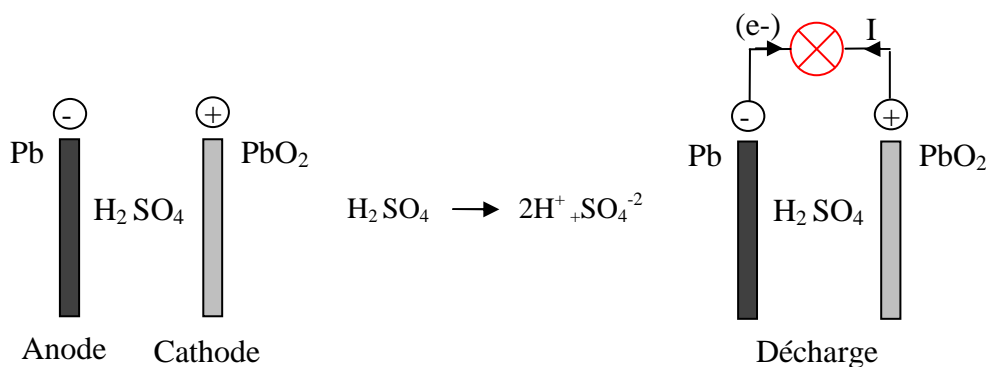
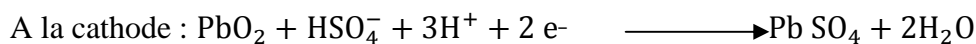
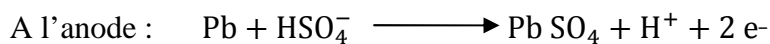


Figure I-11: Cellule élémentaire d'une batterie plomb-acide

b) Réactions chimiques



9.3.1.3. Accumulateurs au lithium

Dans ce type d'accumulateurs l'électrode positive, composée d'une structure en couches, est constituée d'un oxyde du type LiMO_2 (M pour métal) pour les accumulateurs lithium-ion. Trois oxydes sont utilisables : LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiFePO_4 et LiMnO_4 . Vu le coût élevé de l'oxyde de cobalt, et de sa forte réactivité à haute température, seuls les autres oxydes sont utilisés [Fon09, Mar05a, Sai04]. Pour les accumulateurs lithium-métal, ce sont l'oxyde de vanadium, l'oxyde de manganèse ou des polymères conducteurs qui sont utilisés [Sai04].

L'électrode négative est réalisée en composés carbonés : graphite, carbone hydrogéné, carbone dur, oxyde mixte de vanadium amorphes, oxyde mixtes à base d'étain ou à base de

titane. Elle sert de matériau d'insertion, elle n'est donc pas modifiée lors de la réaction [Fon09, Sai04].

L'électrolyte est une solution de LiPF_6 dans un mélange de solvant organique. Il se trouve sous forme liquide ou solide (polymère sec, polymères-gels ou composées organiques vitreux). Pour les applications basse température, une tendance consiste à utiliser les sels fondus (constitués uniquement d'anions et de cations) [Mar05b, Sai04].

a) Principe de fonctionnement

Lors de la décharge de l'accumulateur (figure I-12), le lithium relâché par l'électrode négative sous forme ionique Li^+ migre à travers l'électrolyte et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive. Le passage de chaque ion lithium dans le circuit interne de l'accumulateur s'accompagne du passage d'un électron dans le circuit externe, donnant ainsi naissance à un courant électrique.

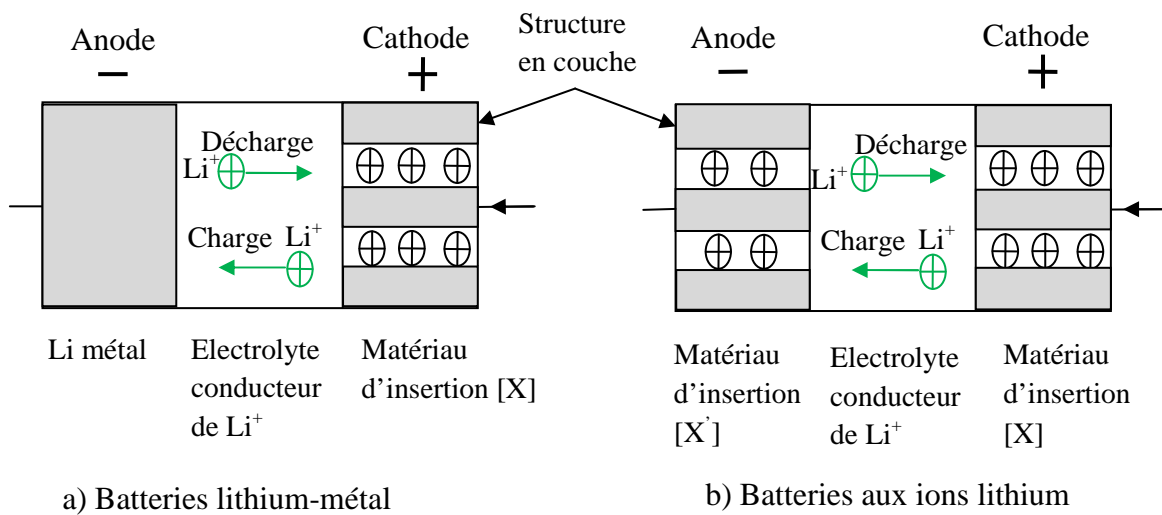


Figure I-12: Principe de fonctionnement des batteries lithium

b) Réactions chimiques

| | Accumulateur Li-métal | Accumulateur Li-ion |
|---------------------|---|---|
| A l'anode | $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$ | $[\text{Li}_n\text{X}'] \rightarrow [\text{X}'] + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$ |
| A la cathode | $[\text{X}] + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \rightarrow [\text{Li}_n\text{X}]$ | $[\text{X}] + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \rightarrow [\text{Li}_n\text{X}]$ |

c) Caractéristiques des batteries au lithium

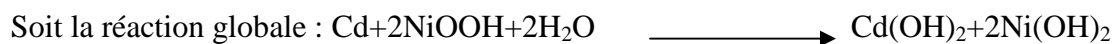
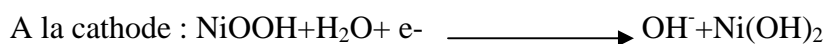
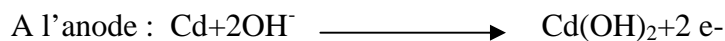
Le lithium est un métal très léger, sa masse molaire atomique est de 6.94 g, et il est le plus réducteur des métaux (grande aptitude à perdre des électrons). La tension à vide d'une cellule élémentaire peut atteindre 4 V, cela constitue un avantage intéressant car la densité d'énergie massique libérée par les réactions électrochimiques au sein de l'électrolyte est à la fois proportionnelle à la différence de potentielle entre les deux électrodes et à la quantité de lithium qui sera intercalée dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Par conséquent, les batteries au lithium offrent les plus importantes densités d'énergie massiques et volumiques (typiquement plus de 160 Wh/kg et 400 Wh/l, supérieures en moyenne de 50 % ou plus par rapport aux batteries conventionnelles [Mar05a, Sai05]).

Finalement, on peut constater que les batteries au lithium offrent d'intéressants avantages par rapport aux batteries plomb-acide [Mar05a]:

- Durée de vie supérieure ;
- Très faible autodécharge ;
- Systèmes 5 à 6 fois plus léger ;
- Absence de maintenance.

9.3.1.4. Batteries Ni-Cd

Ces batteries utilisent une cathode d'hydroxyde de nickel Ni(OH)_2 , une anode de cadmium et un électrolyte en hydroxyde de potassium KOH. Cette batterie est chère et ses éléments sont toxiques [Jea07]. Les réactions de décharge sont données par les équations chimiques suivantes :



Les batteries Ni-hydrures métalliques, non toxique et de grande densité d'énergie stockée dans une gamme de température étendue, tendent à remplacer les batteries Ni-Cd. Les hydrures métalliques sont utilisés ici comme électrode négative puisque elles sont capables de stocker de l'hydrogène, utilisé comme élément actif. L'électrode positive est en hydroxyde de nickel et l'électrolyte un hydroxyde de potassium qui doit absorber les ions H^+ . Leur inconvénient est de ne pas retrouver leur pleine capacité si elles ne sont pas complètement déchargées (effet mémoire) [Jan08, Jea07, Bo09].

9.3.1.5. Batteries à circulation (Redox-Flow)

Les batteries Redox sont des batteries à circulation d'électrolyte. Elles utilisent des ions Vanadium de valence différente, séparés par une membrane perméable aux protons. Les échanges électroniques dans la phase aqueuse au niveau des électrodes correspondent au changement d'état d'oxydation du Vanadium. Par l'utilisation de grands réservoirs et le couplage de plusieurs cellules de grandes quantités d'énergie peuvent être stockées et restituées. Le rendement énergétique d'un tel système peut atteindre 75 %. [Cou05, Hua08 Jea07]. Le schéma de principe de la batterie à circulation est donné sur la figure (I-13).

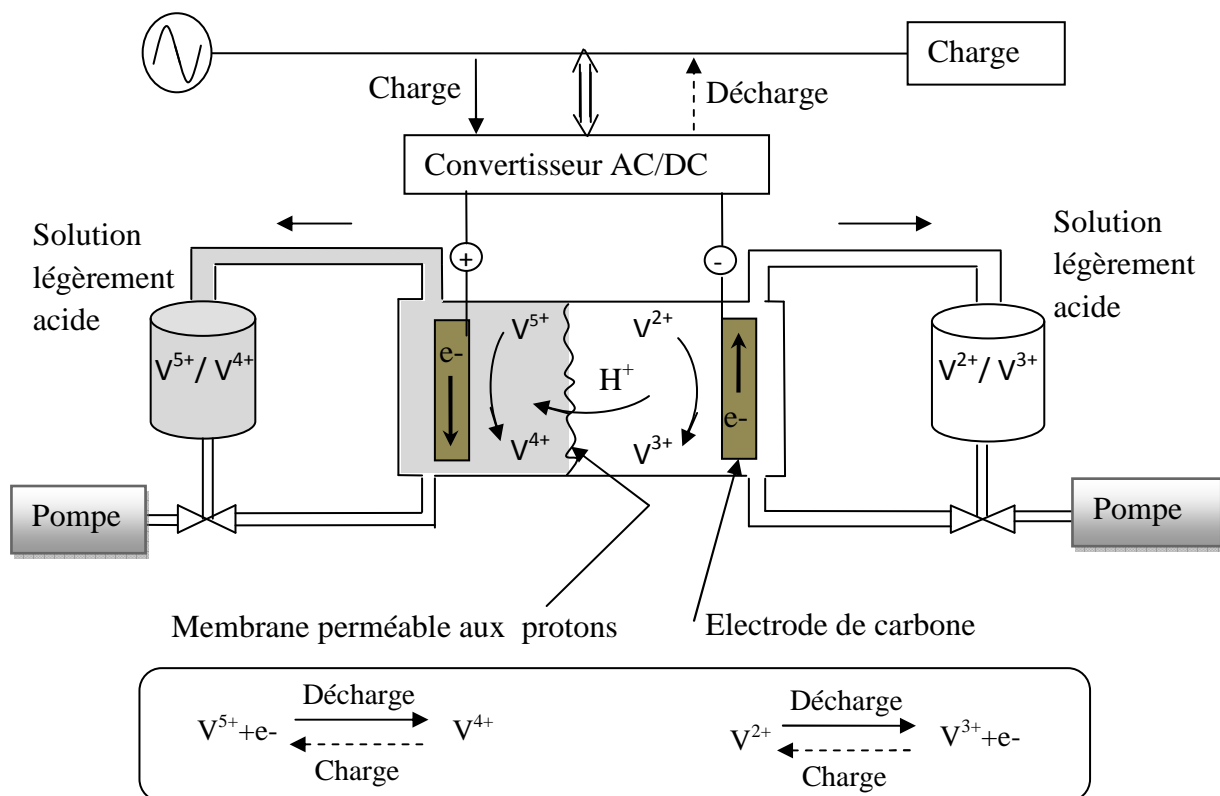


Figure I-13 : Principe de fonctionnement d'une batterie Redox Flow au vanadium

9.3.2. Stockage mécanique

9.3.2.1. Système inertielle de stockage d'énergie (SISE)

a) Définition

Les systèmes modernes de stockage d'énergie par volant d'inertie sont constitués d'un cylindre rotatif massif, supporté par lévitation magnétique et couplé à un moteur/générateur. La maintenance de tels systèmes est légère et leur durée de vie est importante (supérieure à 20 ans) [Cim05, Rys08].

Un système à bas coût convient aux applications de faible puissance en site isolé, tel que le dispositif de 2 kW/ 6 kWh donné sur la figure (I-14). Une association de plusieurs unités convient pour le stockage dans les grandes installations [Cou05].

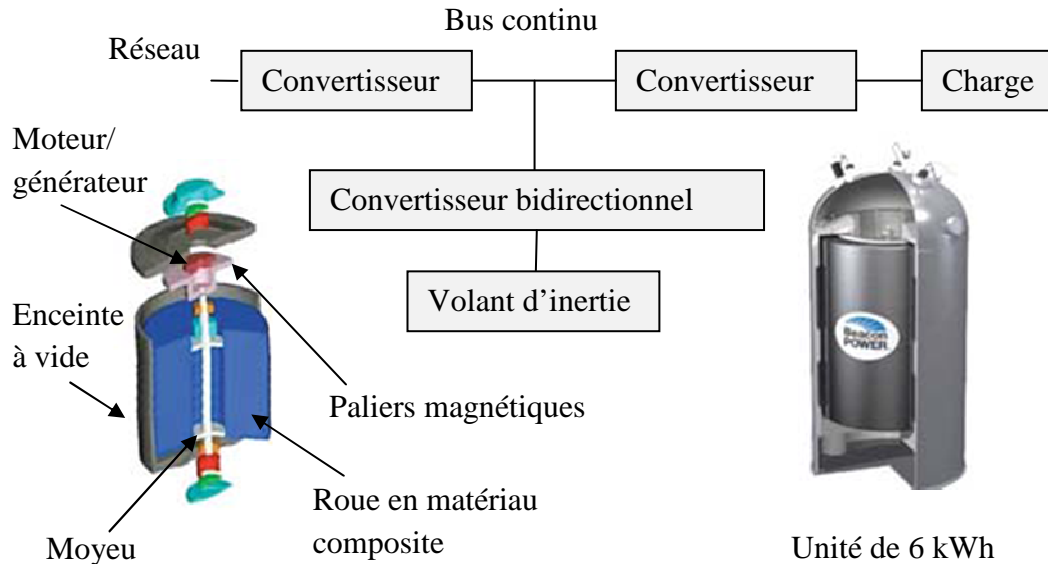


Figure I-14 : Système inertielle de stockage d'énergie [Cou05]

b) Fonctionnement

Lors de la phase de stockage l'énergie électrique est convertie via le moteur en énergie mécanique. Cette énergie est stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique.

Au cours de la décharge du SISE l'énergie cinétique est reconvertie en énergie électrique par l'intermédiaire du générateur.

Le régime de fonctionnement est imposé par le convertisseur d'électronique de puissance, qui impose le sens de transfert d'énergie à travers la machine électrique.

c) Application

Les SISEs couvrent certaines applications spécifiques [Cim05]:

- ❖ Source ininterrompue de tension pour protéger les consommateurs contre les chutes de tensions accidentelles ;
- ❖ Source de tension embarquée sur les véhicules électriques ou sur les installations spéciales ;
- ❖ Améliorations de la qualité d'énergie électrique de la production décentralisée.

d) Description mathématique

Si J est le moment d'inertie du volant, souvent de forme cylindrique à paroi mince, et Ω sa vitesse de rotation alors son énergie cinétique est :

$$W_c = \frac{1}{2} J \Omega^2 \quad (\text{I-1})$$

Avec $J = K M R^2$, K est un facteur qui tient compte de la géométrie du volant.

M et R sont respectivement la masse et le rayon maximal du volant.

Cette énergie est limitée par la résistance mécanique du matériau de fabrication (matériaux composites à fibre de carbone, métaux, fibre d'aramide) et sa vitesse ne peut dépasser certaine limite en raison de la force centrifuge [Cim05].

9.3.2.2. Stockage hydraulique (gravitaire)

Ancienne méthode utilisée depuis 1929, un tel système (figure I-15) comporte deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes. Si l'énergie est excédentaire sur le réseau l'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur, où elle est stockée. En fonction de la demande l'eau peut revenir au réservoir inférieur, mais en actionnant une turbine qui entraîne à son tour un générateur électrique [Ana08, Jea07, Rys08].

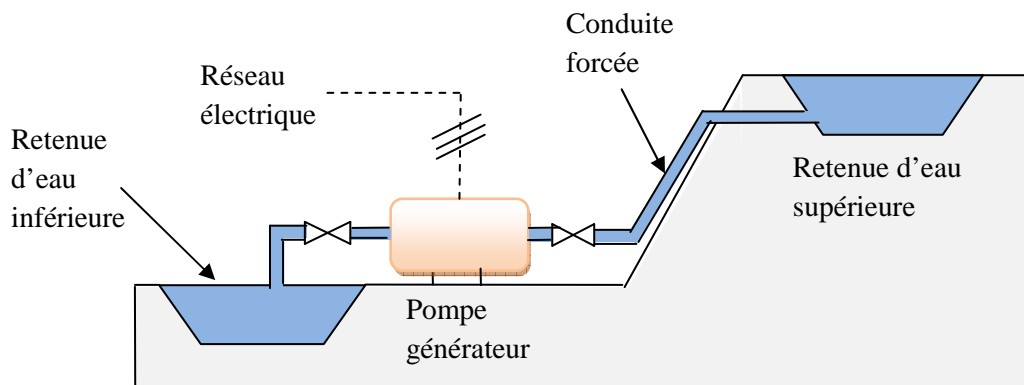


Figure I-15 : Stockage gravitaire

L'énergie stockée et la puissance sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} W = mgh \\ P = \bar{m}gh \end{cases} \quad (\text{I-2})$$

Avec m et \bar{m} sont respectivement la masse et le débit massique de l'eau,

h : hauteur de la chute et g : pesanteur ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

9.3.2.3. Stockage par air comprimé

Cette technologie de stockage comporte un grand réservoir souterrain, bien étanche, où l'on peut stocker de l'air comprimé en fonction de la demande, l'air comprimé est délivré à une turbine à gaz entraînant un générateur électrique. Ainsi l'énergie potentielle de l'air comprimé est transformée en énergie électrique (figure I-16) [Jea07, Lun09, Rys08].

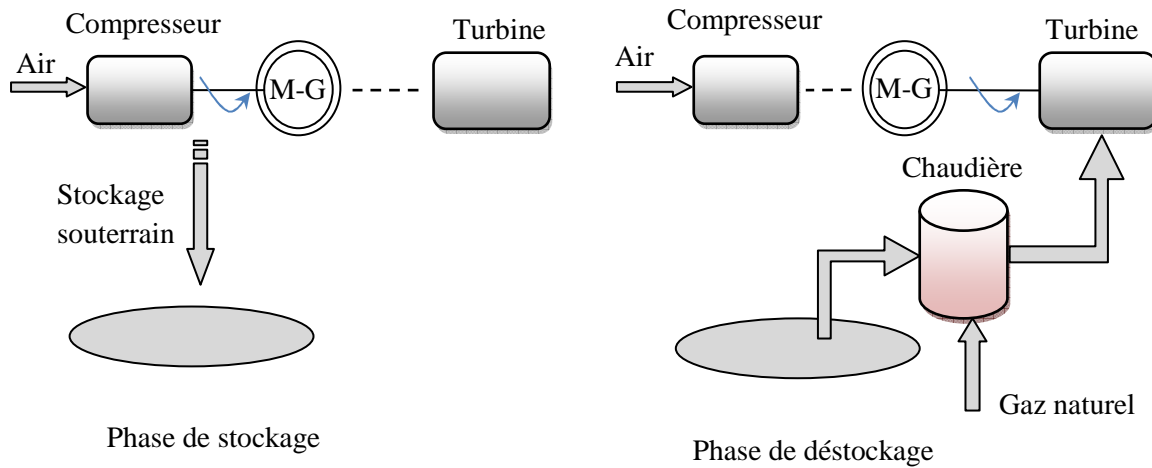


Figure I-16 : Principe de fonctionnement d'un système de stockage à air comprimé

En vue d'améliorer le rendement, lors de la phase de déstockage on utilise du gaz naturel pour la combustion. Néanmoins, le rendement reste pénalisé par le coût énergétique élevé de la compression et la phase de démarrage qui est lente [Jea07].

9.3.3. Stockage électromagnétique

9.3.3.1. Super capacités (stockage électrostatique)

Les performances et les utilisations des super condensateurs sont en constante progression depuis plus de 20 ans. Ils se présentent sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide (Figure I-17) [Sai04].

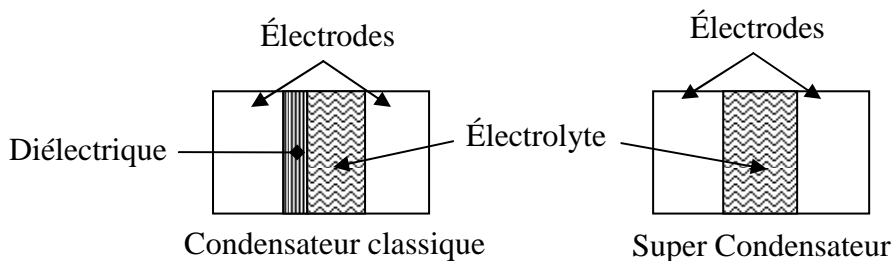


Figure I-17 : Différence entre un super condensateur et un condensateur classique

L'isolement entre les deux électrodes se fait par l'intermédiaire d'un solvant contenu dans l'électrolyte. Les électrodes sont faites du charbon actif, ce qui permet d'augmenter considérablement leur surface active et d'obtenir des valeurs de capacité très élevées dans un encombrement réduit [Jea07, Sai04].

a) Principe de fonctionnement

Découvert par Helmholtz en 1879, le principe de fonctionnement des super condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface entre l'électrolyte et chaque électrode (figure I-18) [Via08].

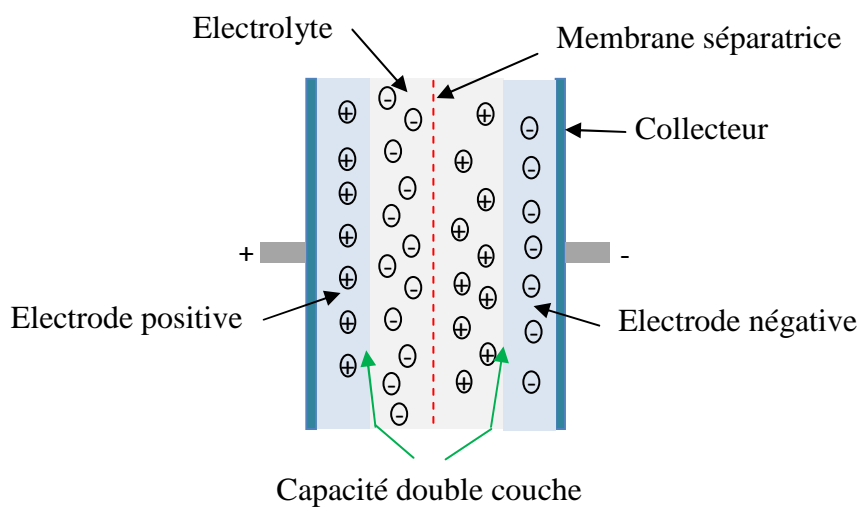


Figure I-18 : Structure simplifiée d'un super condensateur

Sous l'influence d'un champ électrique créé par la différence de potentiel appliquée aux bornes du condensateur lors de la charge, les ions de l'électrolyte se déplacent en direction de l'électrode de signe opposé. Lorsque le condensateur est chargé, une fraction des anions et des cations de l'électrolyte est ainsi localisée dans le voisinage immédiat des électrodes, de façon à équilibrer la charge en excès dans le charbon actif. Les deux couches de charge en excès de polarité opposée à l'interface électrode-électrolyte forment la double couche électrochimique [Via08, Jea07, Sai04]. Une étude détaillée est donnée dans [Aya04] et [Bel01].

b) Modèle électrique

Le schéma électrique simplifié d'un super condensateur est représenté sur la figure (I-19). Les deux zones chargées aux interfaces électrode-électrolyte se comportent comme deux condensateurs en série C_a et C_b [Via08].

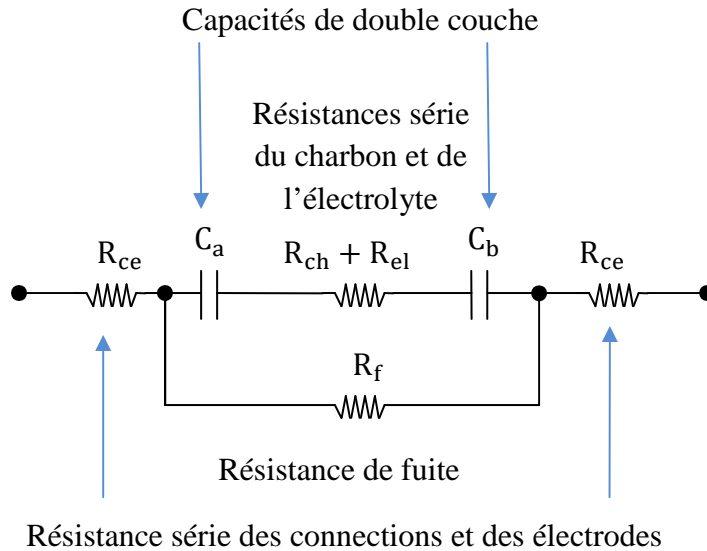


Figure I-19 : Schéma électrique simplifié d'un super condensateur

La résistance des fuites R_f prend en compte le phénomène d'autodécharge, plus au moins important suivant les technologies employées et qui est minimisé dans le cas des électrodes de carbone.

Les résistances des bornes et des collecteurs de courant R_{ce} , celles du charbon actif R_{ch} et la résistance équivalente de l'électrolyte R_{el} constituent avec R_f la résistance série équivalente qui limitent les performances du super condensateur.

9.3.3.2. Stockage magnétique dans les supra inductances

Cette technique utilise le champ magnétique comme moyen de stockage. L'énergie stockée par unité de volume dans l'air est donnée par :

$$\frac{dW}{dV} = \mu_0 \frac{B^2}{2} \quad \text{(I-3)}$$

Avec μ_0 est la perméabilité magnétique du vide $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m et B l'induction magnétique en Tesla (T).

La bobine peut avoir une géométrie solénoïde, mais avec des champs de fuites élevés ou une forme torique permettant de réduire considérablement les champs parasites (figure I-20).

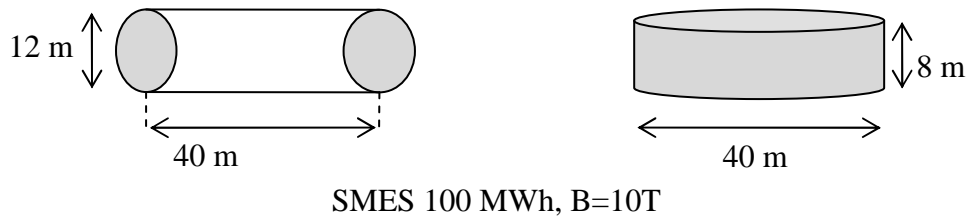


Figure I-20: Géométrie torique et solénoïde d'un SMES [Jea07]

L'utilisation des matériaux supraconducteurs permet d'obtenir des densités d'énergie de l'ordre de 10 kWh/m^3 dans de grands volumes. L'absence de résistance des conducteurs dans l'état supraconducteur autorise le stockage de l'énergie dans un bobinage court-circuité sur lui-même pendant un temps théoriquement infini. Cependant, l'utilisation des supraconducteurs comme NbTi nécessite une température de fonctionnement de l'ordre de 4 K, cela conduit à des coûts de refroidissement et d'isolation élevés [Jea07, Dou01].

La recherche dans ce domaine vise l'amélioration du refroidissement des supra inductances par le développement des matériaux supraconducteurs à haute température critique qui donnent la possibilité de travailler à des températures supérieures à 77 °K (température de l'azote liquide) [Dou01, Tha10].

10. Hydrogène, vecteur énergétique de l'avenir

10.1. Caractéristiques de l'hydrogène

Incolore, inodore et non corrosive, cette molécule a l'avantage d'être particulièrement énergétique : 1 kg d'hydrogène libère environ 3 fois plus d'énergie que 1 kg d'essence (soit 120 MJ/kg contre 45 MJ/kg pour l'essence). L'inconvénient est que l'hydrogène occupe, à poids égal beaucoup plus de volume qu'un autre gaz. Ainsi pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4.6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars [CEA04].

10.2. Complémentarité aux énergies renouvelables

Le recours à l'hydrogène est justifié par la souplesse d'utilisation qu'il apporte à l'électricité. En effet, si l'on sait produire de l'électricité de multiples procédés, on ne sait pas la stocker efficacement. De plus, les batteries sont coûteuses et n'offrent qu'une autonomie limitée. Grâce à l'hydrogène, il devient possible de produire de l'électricité n'importe où et n'importe quand, sans être reliée au réseau électrique.

A ce niveau, l'hydrogène peut devenir le parfait complément des énergies renouvelables. En effet, l'intermittence des énergies photovoltaïque et éolienne peut être résolue : en cas de surproduction, l'énergie excédentaire peut servir à produire de l'hydrogène et lorsque la production est insuffisante l'hydrogène peut à son tour être reconverti en électricité [Der07, Duf08, Kor08].

10.3. Production de l'hydrogène

La production de l'hydrogène doit répondre à trois critères : la compétitivité, le rendement énergétique et la propreté. Autre que la production à partir des combustibles fossiles par reformage, émettrices des gaz à effet de serre, une voie prometteuse est la production par électrolyse de l'eau. Ce procédé (figure I-21) consiste à dissocier les atomes d'oxygène et d'hydrogène combinés dans les molécules d'eau grâce au courant électrique (selon la réaction : $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$). Cependant cette solution est intéressante en termes d'émission de gaz à effet de serre si elle s'opère en association avec les énergies renouvelables.

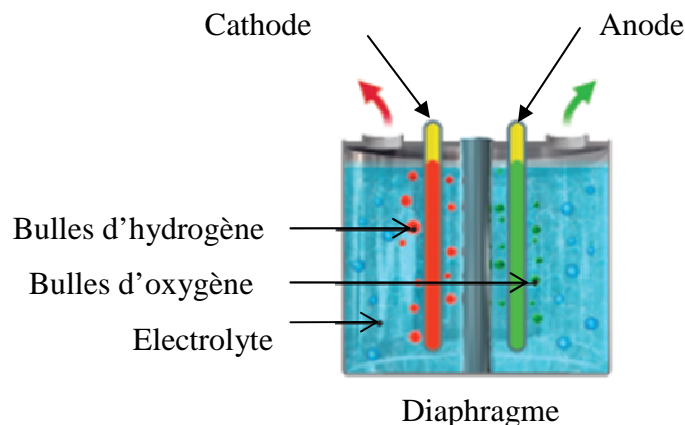


Figure I-21 : Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

10.4. Production de l'électricité à partir de l'hydrogène

A l'aide d'une pile à combustible (PAC), il est possible de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité. L'utilisation de cette cogénération permet d'atteindre des rendements très intéressants qui vont jusqu'à 80% dans certains cas [CEA04, Sai04].

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Tandis que l'électrolyse décompose l'eau en hydrogène et en oxygène sous l'action d'un courant électrique, la PAC recombine ces deux éléments en créant un courant électrique (figure I-22).

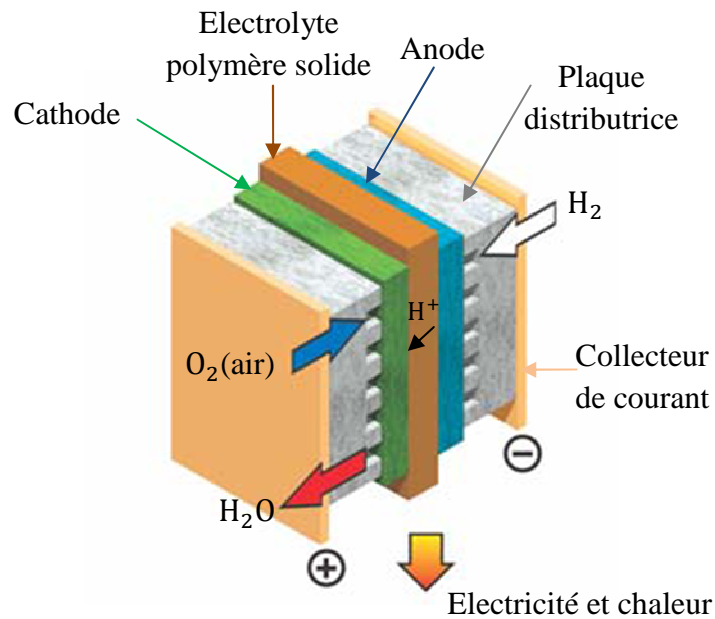


Figure I-22 : Structure de base d'une PAC. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons [CEA04]

11. Récapitulatif des systèmes de stockage

11.1. Avantages et inconvénients

On peut résumer les avantages et inconvénients de chacun des systèmes de stockages étudiés dans le tableau (I-3) [Jea07].

Tableau I-3 : Comparaison des technologies de stockage

| Technologies | Avantages | Inconvénients |
|----------------------|---|---|
| Batteries Pb-Acide | faible coût | durée de vie faible |
| Batteries Li-ion | grande densité d'énergie et de puissance bon rendement | coût élevé circuit de charge spécial |
| Batteries Ni-Cd | grande densité d'énergie et de puissance bon rendement | toxicité |
| Batteries Redox-Flow | capacité de stockage importante | faible densité d'énergie |
| Pompage hydraulique | capacité de stockage importante faible coût | sites spécifiques délais de construction |
| SISE | puissance élevée | faible densité d'énergie |

Tableau I-3 (suite) : Comparaison des technologies de stockage

| Technologies | Avantages | Inconvénients |
|----------------|--|---|
| Air comprimé | capacité de stockage importante faible coût | sites spécifiques couplé avec du gaz naturel |
| Super capacité | durée de vie élevée bon rendement | faible densité d'énergie |
| SMES | puissance élevée | faible densité d'énergie coût élevée |

11.2. Autres caractéristiques

Les tableaux (I-4) et (I-5) donnent quelques caractéristiques des moyens de stockage à petite échelle et à grande échelle respectivement [Cim05].

Tableau I-4 : Caractéristiques des moyens de stockage à petite échelle

| Technologie | Supra conducteur | Super capacité | Electrochimique | Volant d'inertie |
|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|--|
| Forme d'énergie | Magnétique | Electrostatique | chimique | mécanique |
| Densité d'énergie | de 1 à 5 Wh/kg | de 10 à 60 Wh/kg | de 20 à 120 Wh/kg | de 1 à 5 Wh/kg |
| Capacité réalisable ou réalisé | kWh | qq ¹ kWh | de qq kWh à qq MWh | de qq kWh à qq 10 kWh |
| Constante de temps | de qq s à 1 min | de qq s à qq min | de 10 min (NiCd) à 10h (Pb) | de qq min à 1h |
| Cyclabilité | de 10000 à 100000 fatigue mécanique | de 10000 à 100.000 | de 100 à 1000 dégradations chimiques | de 10000 à 100000 fatigues mécaniques |
| Rendement électrique | >0.9 | de 0.8 à >0.9 selon régime | de 0.7 à 0.8 selon technologie et régime | de 0.8 à >0.9 selon régime |
| Connaissance de l'état de charge | aisée (courant) | aisée (tension) | difficile (paramètres variables) | aisée (vitesse) |
| Remarques | cryogénie | grande cyclabilité | technologie mature | coût global compétitif sur la durée de vie |

¹ qq : quelque

Tableau I-5 : Caractéristiques des moyens de stockage à grande échelle

| Technologie | Hydraulique gravitaire | Batteries électrochimiques |
|----------------------|--|---|
| Densité d'énergie | 1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m | Pb : 33 kWh/t Li-ion 100 kWh/t |
| Capacité réalisable | de 1 à 100 GWh | 0.1 à 40 MWh |
| Puissance réalisable | 0.1 à 1 GW | 0.1 à 10 MW |
| Rendement électrique | 0.6 à 0.8 | 0.7 ou moins en décharge rapide |
| maturité | très bonne | plusieurs expériences avec des technologies matures |
| Remarques | sites avec dénivelée et retenue d'eau | métaux lourds |

Conclusion

Dans cette partie, une description de la situation énergétique mondiale et les raisons incitantes au développement des énergies nouvelles ont été abordés, une attention particulière est portée sur la filière renouvelable éolienne.

L'aérogénérateur, qui abrite les éléments de la chaîne de conversion éolienne, peut avoir plusieurs structures qui se diffèrent principalement par le type de machines électriques utilisées et les convertisseurs d'électronique de puissance associés dont dépendent fortement les performances d'une chaîne de conversion.

Le développement des énergies renouvelables, en particulier leur intégration au réseau électrique de distribution, conduit à des besoins nouveaux en matière de stockage d'énergie. L'exploitation des technologies présentées varie selon les applications, néanmoins, elles doivent assurer : un bon rendement énergétique, un bas coût, une fiabilité élevée et une sécurité d'exploitation.

CHAPITRE II :

TECHNIQUES DE CONTROLE EN PUISSANCE D'UNE TURBINE EOLIENNE

Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude du fonctionnement et la modélisation de la turbine éolienne. La connaissance des paramètres de la turbine éolienne, précisément sa courbe des maximas de puissance, permet de faciliter l'extraction du maximum de puissance de l'énergie cinétique du vent. Dans le cas contraire, l'utilisation d'algorithmes ne nécessitant pas la connaissance de cette courbe paraît comme une solution attractive, En effet, deux méthodes non linéaires : méthode du gradient et de la logique floue sont abordées dans ce chapitre.

La limitation de la puissance pour les forts vents est aussi importante que l'extraction du maximum de puissance. Par conséquent, les techniques de limitation sont décrites et des résultats de simulation obtenus sous Matlab sont présentés.

1. Modélisation de la turbine éolienne

1.1. Caractéristiques des pales

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface de la pale. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la figure (II-1) [Jea06].

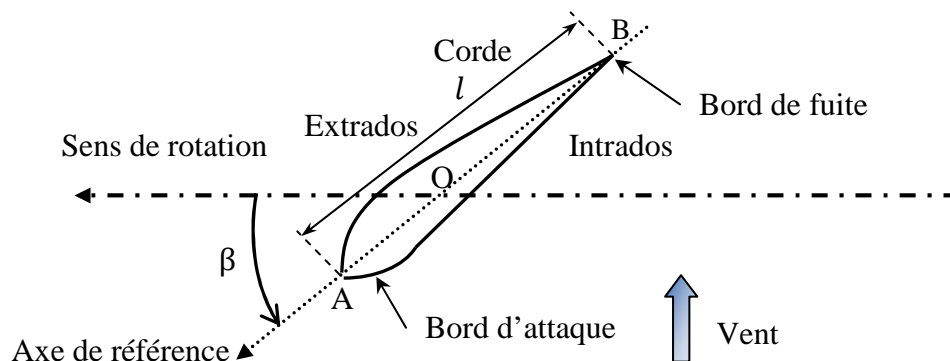


Figure II-1: Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivant :

- Extrados : le dessus de la pale ;
- Intrados : le dessous de la pale ;
- Corde : qui est défini comme étant la longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite ;
- Angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et leurs paramètres sont bien définis.

Du fait de la rotation de la pale, le tronçon de largeur dr situé à une distance r du moyeu est soumis à la fois au vent incident de vitesse \vec{V} et à un vent relatif de vitesse \vec{U} dirigée dans le sens contraire de la rotation à la vitesse Ω (figure II-2) [Jea06, Lav05].

$$U = r \Omega \quad (\text{II-1})$$

La vitesse résultante \vec{W} du vent s'écrit donc :

$$\vec{W} = \vec{V} + \vec{U} \quad (\text{II-2})$$

La vitesse résultante du vent \vec{W} fait un angle d'attaque Ψ avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit :

$$\Psi = \arctan \left(\frac{V}{U} \right) \quad (\text{II-3})$$

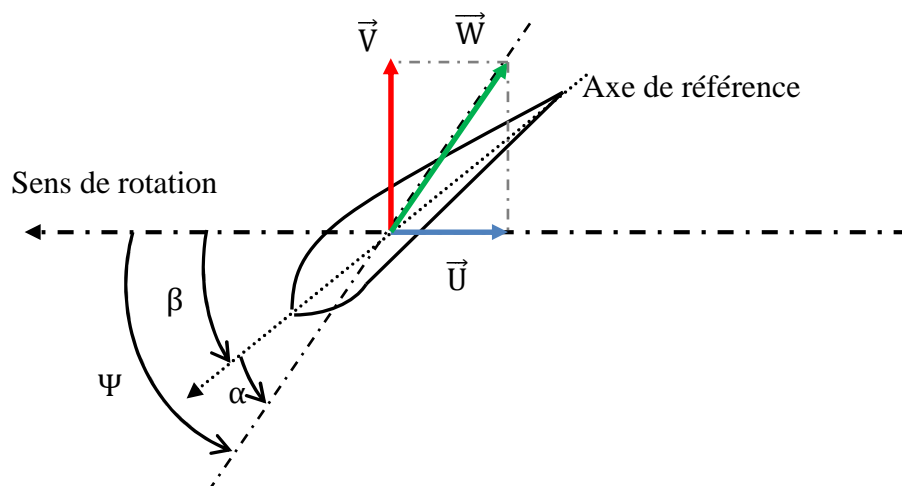


Figure II-2: Direction du vent sur un tronçon d'une pale

On introduit alors **l'angle d'incidence**, noté α entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent.

$$\alpha = \Psi - \beta \quad (\text{II-4})$$

1.2. Rendement énergétique de la turbine éolienne

On considère le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II-3). V_1 est la vitesse moyenne axiale d'écoulement des masses d'air en amont de la turbine et V_2 leur vitesse axiale en aval [Mul04, Mun08, Poi03].

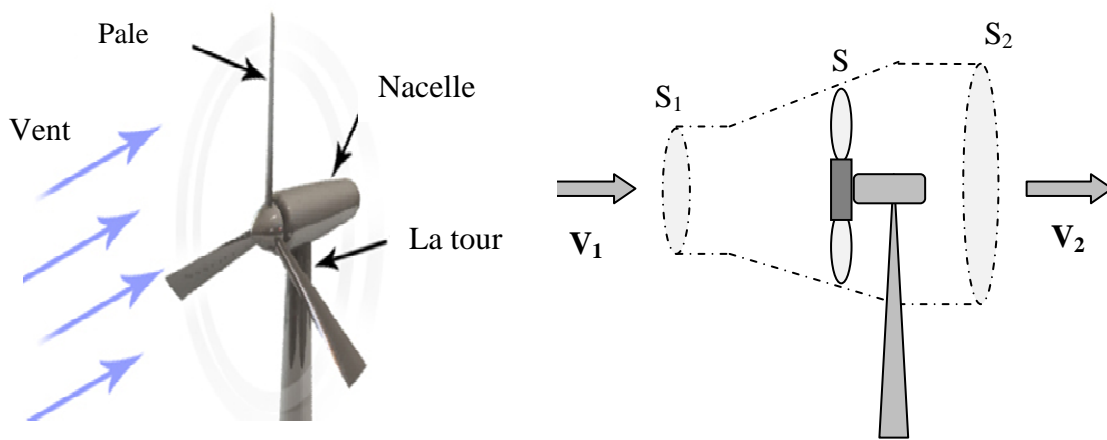


Figure II-3: Écoulement des masses d'air autour de la turbine éolienne

On suppose que la vitesse moyenne d'écoulement V_0 sur la surface S balayée par les pales de la turbine est :

$$V_0 = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (\text{II-5})$$

Si m représente la masse d'air qui traverse la surface S par unité de temps à la vitesse V_0 , on obtient :

$$m = \frac{1}{2}\rho S V_0 \quad (\text{II-6})$$

Avec ρ masse volumique de l'air (1.225 kg/m^3 au niveau de la mer)

La puissance P_m alors extraite s'exprime selon la seconde loi de Newton par :

$$P_m = \frac{1}{2}m(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II-7})$$

Soit, en remplaçant m par son expression :

$$P_m = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad \text{(II-8)}$$

Si l'énergie cinétique d'une masse d'air qui se déplace avec une vitesse V_1 pouvait être complètement récupérée par une turbine, la puissance instantanée serait :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad \text{(II-9)}$$

Mais, par suite de la vitesse non nulle des masses d'air derrière la turbine, une partie seulement de cette puissance est extraite. On définit l'aptitude de conversion de l'énergie éolienne par le coefficient de puissance C_p ($C_p < 1$), exprimé par le rapport :

$$C_p = \frac{P_m}{P_t} \quad \text{(II-10)}$$

En calculons $\frac{dP_m}{dV_2}$, on trouve que le maximum de puissance est donné par (*formule de Betz*) [Mul04, Rys08]:

$$P_{t_max} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 \quad \text{(II-11)}$$

Il s'en suit :

$$C_{p_max} = \frac{P_{m_max}}{P_t} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad \text{(II-12)}$$

L'efficacité de la captation d'énergie, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques et des réglages de la chaîne de conversion est inférieure à cette limite.

La puissance extraite du vent par l'éolienne sera donnée par la formule :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho S V_1^3 \quad \text{(II-13)}$$

On introduit une variable sans dimension appelée *vitesse spécifique* pour caractériser les performances aérodynamiques d'une turbine éolienne:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_1} \quad \text{(II-14)}$$

Avec,

Ω : Vitesse angulaire de rotation de la turbine ;

R : Rayon de la turbine.

Le rendement aérodynamique $\eta_a = \frac{C_p(\lambda)}{C_{p_max}}$ est, de ce fait, représentatif de la qualité aérodynamique de l'éolienne dans les meilleures conditions de réglage [Mul04].

1.3. Zones de fonctionnement

La figure (II-4) représente la caractéristique d'exploitation d'une éolienne à axe horizontal. Cette caractéristique est le résultat des trois contraintes [Mun08, Fer07]:

- ✓ Le caractère très fluctuant du vent ;
- ✓ Le couple de démarrage est d'autant plus grand que le nombre de pales est élevé ;
- ✓ La résistance mécanique limitée de la structure.

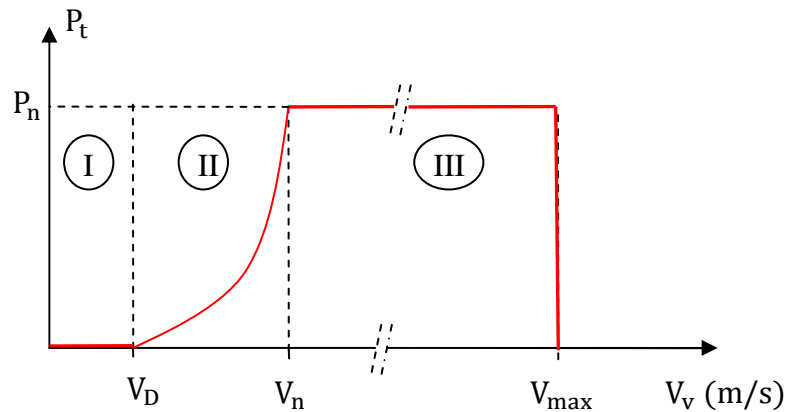


Figure II-4: Courbe typique de la puissance extraite par une turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent

La zone I correspond aux vitesses du vent inférieures à la vitesse de démarrage V_D de la turbine : l'éolienne ne fonctionne pas.

La zone II correspond à la zone où il est possible d'optimiser la conversion d'énergie (vitesse variable et puissance récupérée variable).

La puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale P_n , zone III, et au delà de la vitesse V_{max} admissible par l'éolienne le système d'arrêt d'urgence intervient et l'éolienne sera arrêtée pour la protéger.

2. Optimisation de la puissance captée par la turbine éolienne

L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet le réglage de la vitesse de la génératrice dans le but de pouvoir capturer le maximum de puissance possible du vent par la turbine. En effet, pour chaque vitesse du vent correspond une vitesse de la génératrice pour laquelle la

courbe de puissance de l'éolienne présente un maximum. L'optimisation de la puissance à ce niveau passe par la recherche permanente de ce maximum par une technique que l'on retrouve dans la littérature sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) [Lav05, Mun08].

Si l'on relie les différents maximums des courbes de puissances (figure II-5a), on obtient celle donnant la puissance maximale extractible pour chaque vitesse du vent, ainsi on obtient la caractéristique du fonctionnement optimal (CFO). Cette caractéristique est placée à droite des maxima du couple sur la figure (II-5b). Sur la courbe $C_p(\lambda)$, cela correspond au point optimal $C_{p_max}(\lambda_{opt})$ (figure II-6). La fonction utilisée $C_p(\lambda)$ est donnée en annexe A (l'exemple pris ici correspond à une turbine de puissance nominale de 400 W).

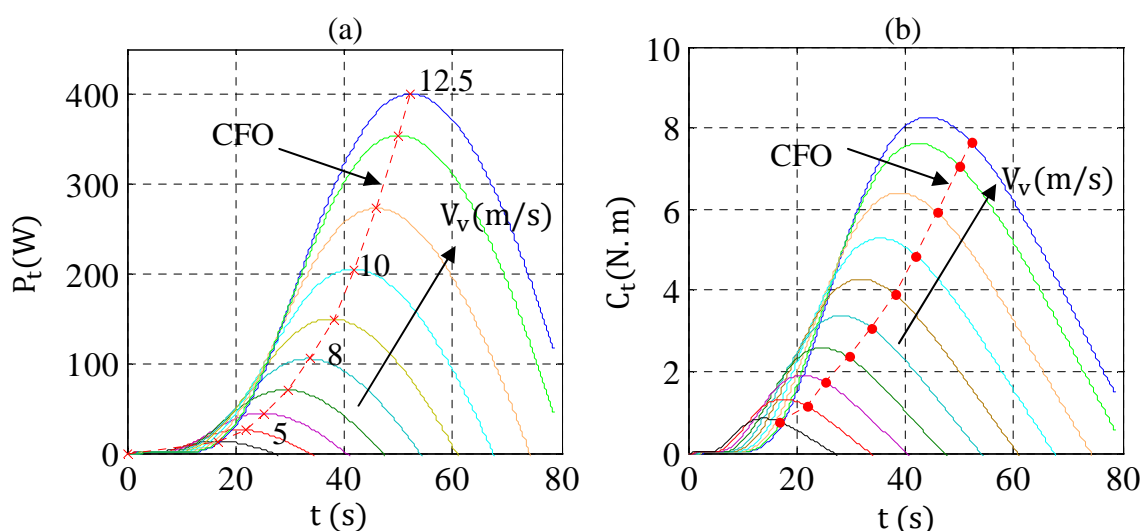


Figure II-5: Caractéristiques de fonctionnement optimal d'une turbine éolienne

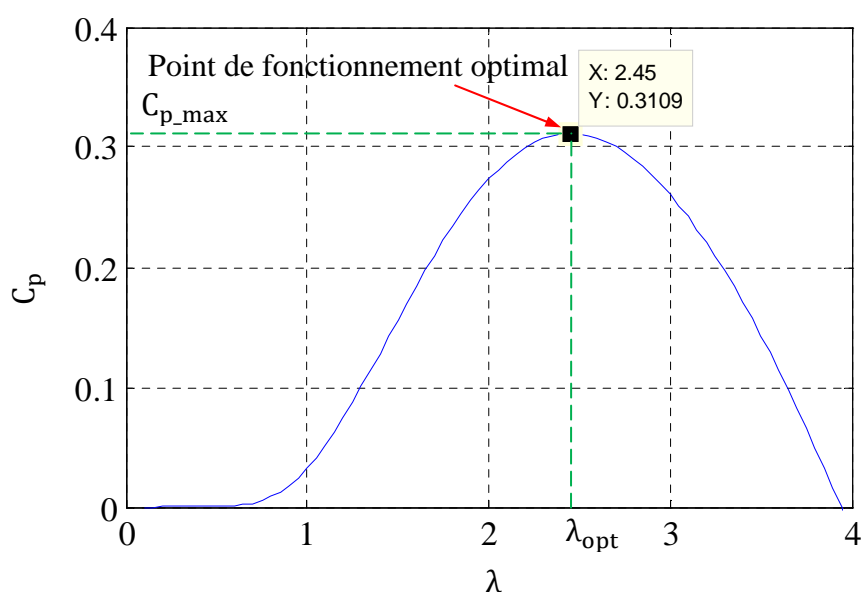


Figure II-6: Allure de performance d'une turbine éolienne

Il existe plusieurs techniques linéaires et non linéaires pour poursuivre le fonctionnement optimal (MPPT), elles diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. Cela dépend, par conséquent, des paramètres et des mesures disponibles [Lav05, Mun08].

2.1. Méthode basée sur la mesure de la vitesse du vent

Cette solution peut être appliquée lorsque la valeur de la vitesse spécifique optimale λ_{opt} est connue. En effet, selon la relation (II-14) la vitesse de référence est :

$$\Omega_{ref}(t) = \frac{\lambda_{opt}}{R} V_v(t) \tag{II-15}$$

Le schéma de principe pour la simulation d'une turbine éolienne par cette méthode, en utilisant un régulateur PI (proportionnel-intégral) pour l'asservissement de la vitesse mécanique, est donné sur la figure (II-7).

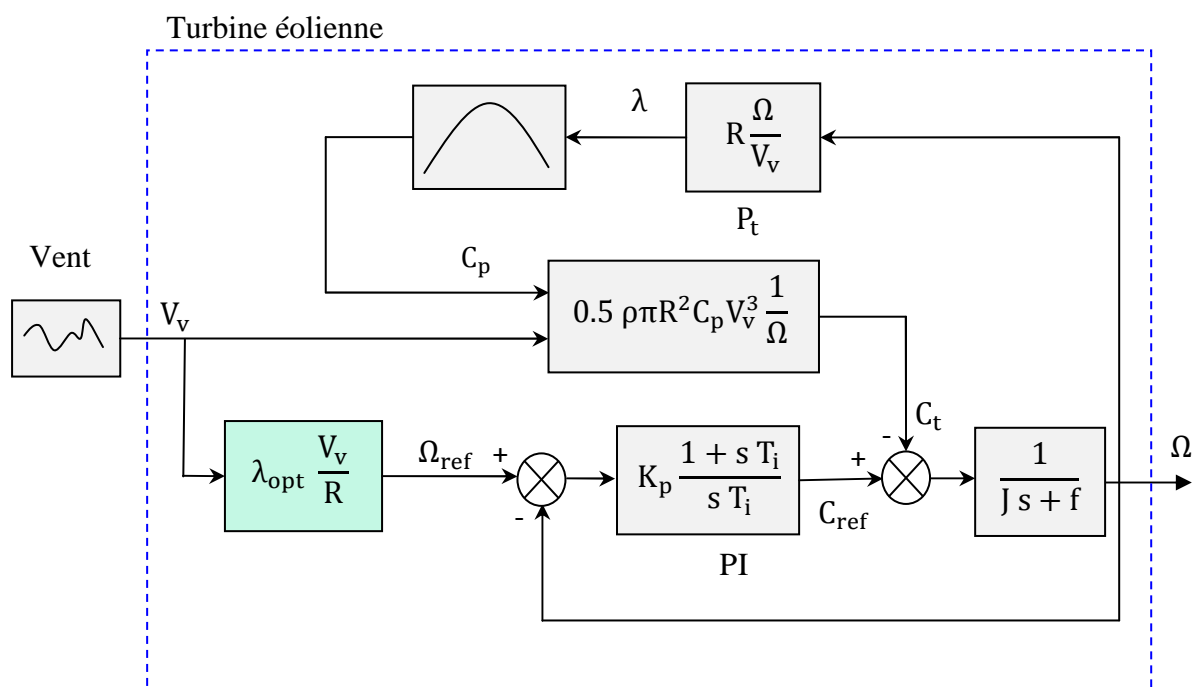


Figure II-7: Schéma bloc de la simulation de la turbine éolienne

Les résultats de simulation obtenus pour une éolienne de 400 W (les paramètres sont donnés en annexe A) en asservissement de vitesse de type PI, sont donnés sur la figure (II-8).

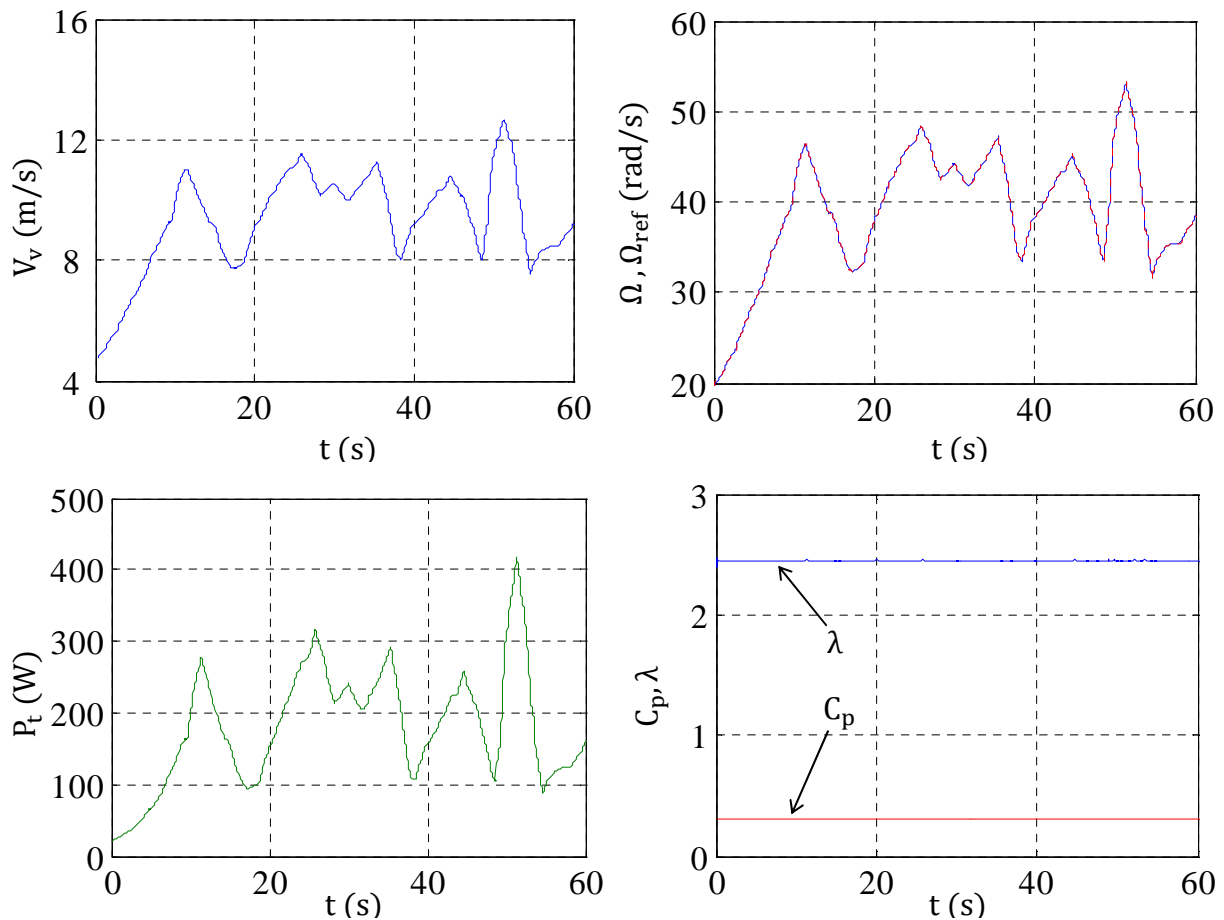


Figure II-8: MPPT en asservissement de vitesse d'une turbine de 400 W

On peut remarquer que la vitesse de rotation suit parfaitement sa référence, qui est variable selon le profil du vent imposé, le coefficient de puissance et la vitesse spécifique sont maintenus à leurs valeurs optimales. Cela permet d'avoir la puissance maximale extractible. Cette méthode va nous servir de référence pour les autres techniques d'optimisation.

Pratiquement, cette approche nécessite la mesure de la vitesse du vent par un anémomètre disposé sur la nacelle, cela constitue un inconvénient car la vitesse mesurée ne correspond pas exactement à la vitesse au niveau des pales et économiquement cette solution est onéreuse et sa réalisation pratique présente quelques difficultés [Taf08].

2.2. Contrôle en puissance

Cette méthode est utilisée lorsque les deux paramètres λ_{opt} et C_{p_max} sont connus. A partir de l'expression (II-13), la puissance extraite par l'éolienne s'exprime comme suit :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (\text{II-16})$$

A l'aide de l'équation (II-14), la puissance peut s'exprimer par l'expression :

$$P_t = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} \rho \pi R^5 \Omega^3 \quad (\text{II-17})$$

Pour un fonctionnement optimal, la puissance de référence est donnée par :

$$P_{\text{ref}} = P_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \frac{C_{p,\text{max}}}{\lambda_{\text{opt}}^3} \rho \pi R^5 \Omega^3 \quad (\text{II-18})$$

On pose :

$$k_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \frac{C_{p,\text{max}}}{\lambda_{\text{opt}}^3} \rho \pi R^5 \quad (\text{II-19})$$

On constate donc que la puissance de référence (optimale) est proportionnelle au cube de la vitesse de rotation de la génératrice :

$$P_{\text{ref}} = k_{\text{opt}} \Omega^3 \quad (\text{II-20})$$

Cette méthode suppose une boucle de contrôle de puissance, sa référence est obtenue par la formule (II-20). Cette approche est largement utilisée pour les moyennes et grandes puissances [Mun08].

2.3. Méthode du gradient

Cette technique est adéquate lorsque les paramètres λ_{opt} et $C_{p,\text{max}}$ sont inconnus. La référence de vitesse est ajustée de manière à ce que la turbine fonctionne autour du point donnant le maximum de puissance pour chaque vitesse de vent. Pour agir sur la vitesse de rotation de la génératrice, on surveille le sens de variation du rapport $\left(\frac{dP}{d\Omega}\right)$. Lorsqu'on atteint le point désiré (maximum de puissance), ce rapport sera nul [Mun08, Lav05, Yin08].

Mathématiquement, on peut écrire:

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{dP}{dt} \left(\frac{d\Omega}{dt}\right)^{-1} \quad (\text{II-21})$$

On distingue quatre cas possibles résumés dans le tableau (II-1) et illustrés par la figure (II-6).

Tableau II-1: Les commandes à effectuer

| | | |
|---|------------------------------|-----------------------------|
| $\frac{d\Omega}{dt} \backslash \frac{dP_t}{dt}$ | < 0 | > 0 |
| < 0 | $\Omega \nearrow$ Cas I | $\Omega \searrow$ Cas II |
| > 0 | $\Omega \searrow$ Cas III | $\Omega \nearrow$ Cas IV |

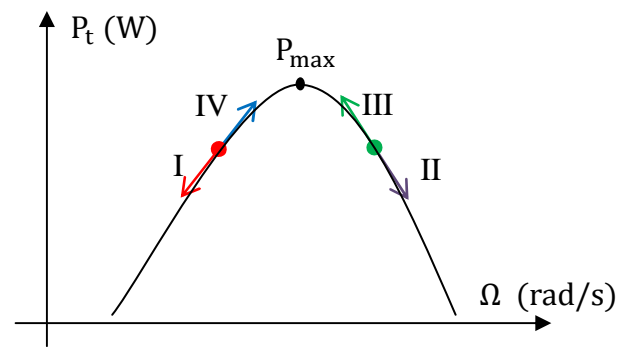


Figure II-9: MPPT par la méthode du gradient

2.3.1. Algorithme de la Méthode du gradient

L'algorithme nécessite la connaissance de la puissance et de la vitesse de rotation à chaque instant. Selon les quatre cas possibles décrits dans le tableau (II-1), à l'itération k on augmente ou on diminue la référence de vitesse Ω_{k+1} d'un pas fixe $\Delta\Omega$. L'algorithme d'optimisation est illustré par l'organigramme de la figure (II-10).

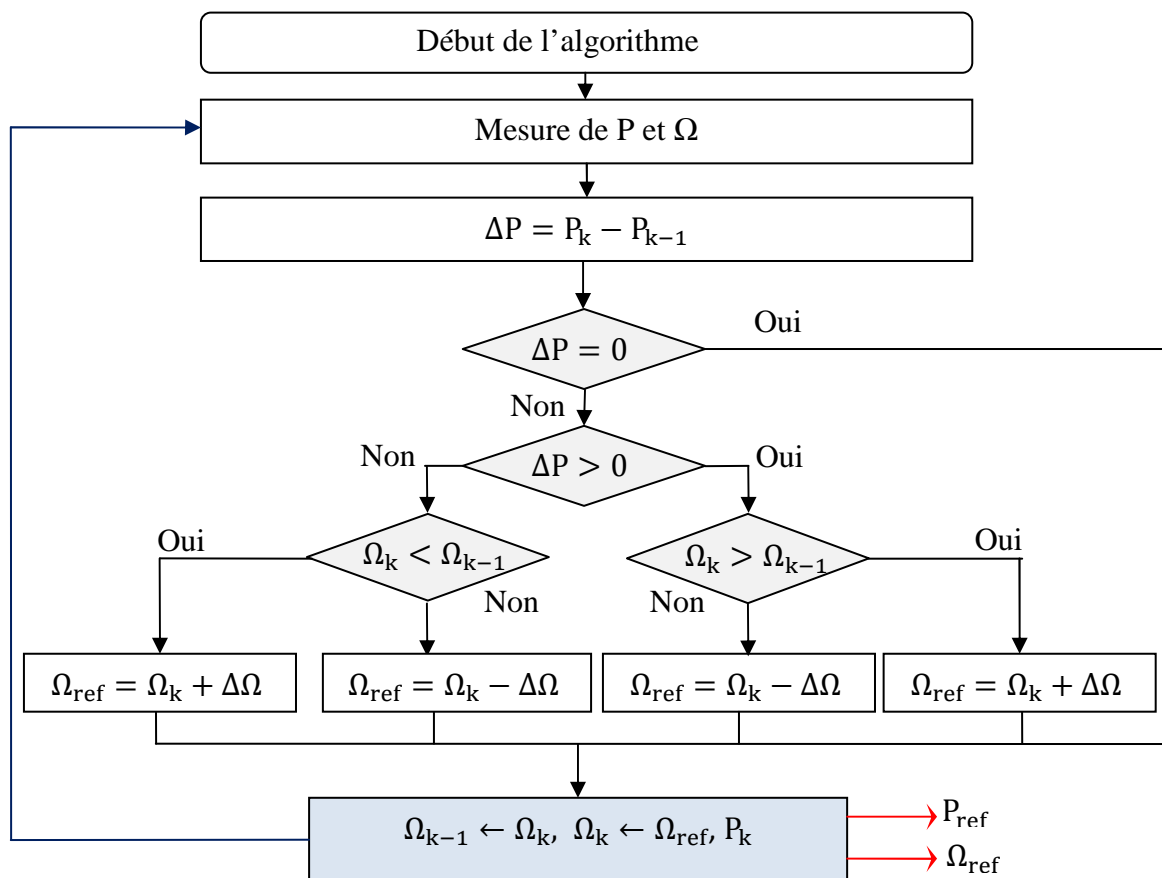


Figure II-10: Algorithme de la MPPT par la méthode du gradient

2.3.2. Résultats de simulation pour une turbine de 400 W

Pour un vent variable selon le profil donné sur la figure (II-11a), les résultats de simulation pour une turbine éolienne de puissance nominale de 400 W sont résumés sur la figure (II-11).

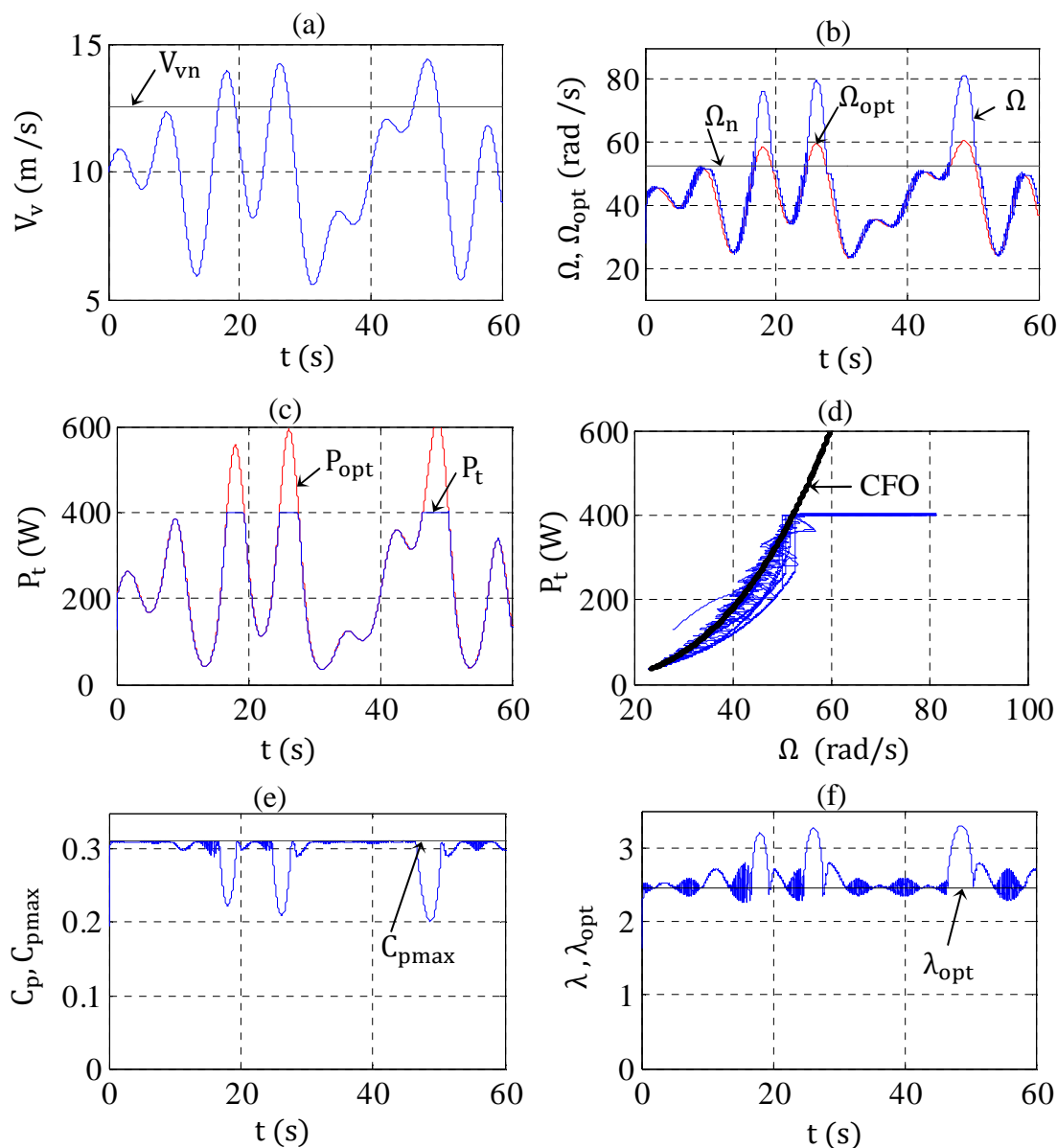


Figure II-11: Résultats de simulation de la méthode du gradient

Avec un pas d'incrément de la vitesse de rotation de 0.05 rad/s, la vitesse obtenue ainsi que la puissance suivent leurs caractéristiques optimales pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse nominale (figure II-11b, c). Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, la puissance est limitée selon la technique décrite dans la section (4.2) de ce chapitre. Sur la figure (II-11d) on remarque des oscillations notables autour de la caractéristique de fonctionnement optimal (CFO) de la turbine, néanmoins le coefficient de

puissance C_p est maintenu à sa valeur maximale et diminue durant les phases de limitation de puissance (figure II-11e), ce qui correspond dans ce cas à une augmentation de la vitesse spécifique λ (figure II-11f).

2.4. MPPT par la logique floue

La méthode du gradient, utilise un pas fixe dont le choix est crucial. De plus, ce choix peut être non approprié lors des variations rapides de la vitesse du vent ce qui affecte le processus de convergence vers le point optimal. L'idéal serait donc de faire varier le pas d'incrément (positif ou négatif) de la vitesse de référence selon les variations du vent, cela est rendu possible grâce à l'algorithme de la logique floue (Quelques notions de base sur la logique floue sont données en annexe B).

A partir des mesures de la puissance et de la vitesse de rotation, le schéma de principe pour la génération de la référence de vitesse par la logique floue est donné sur la figure (II-12).

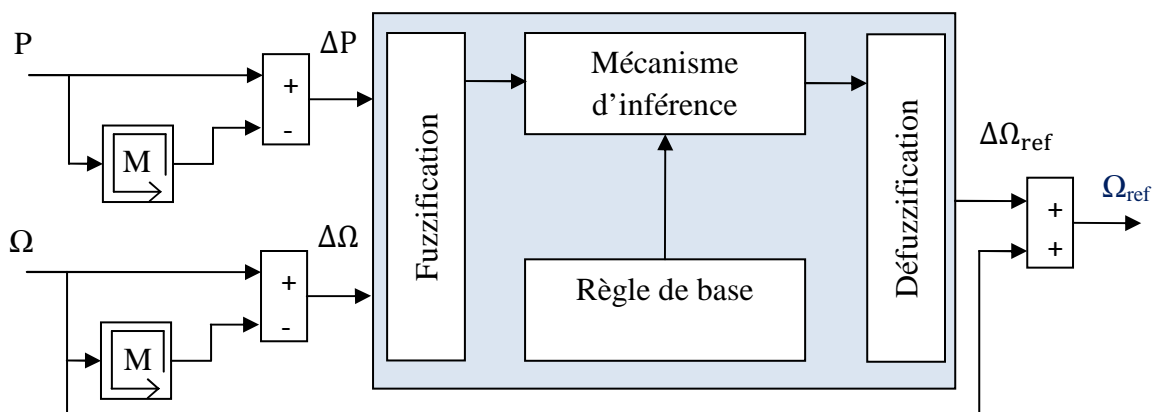


Figure II-12: Schéma de principe pour l'optimisation de la puissance par la logique floue

2.4.1. Fuzzification des entrées

La Fuzzification est l'étape de conversion des données classiques (valeurs numériques) vers des données appartenant au domaine flou (variables linguistiques) à l'aide des fonctions d'appartenance de la logique floue (fonctions triangulaires dans notre cas) figure (II-12a).

La détermination du degré d'appartenance dans ce cas est réalisée à l'aide de la relation suivante (figure (II-13b)) [Alt08, Muy09]:

$$\mu(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-x_1}{x_2-x_1}, \frac{x_3-x}{x_3-x_2} \right), 0 \right] \quad \text{(II-22)}$$

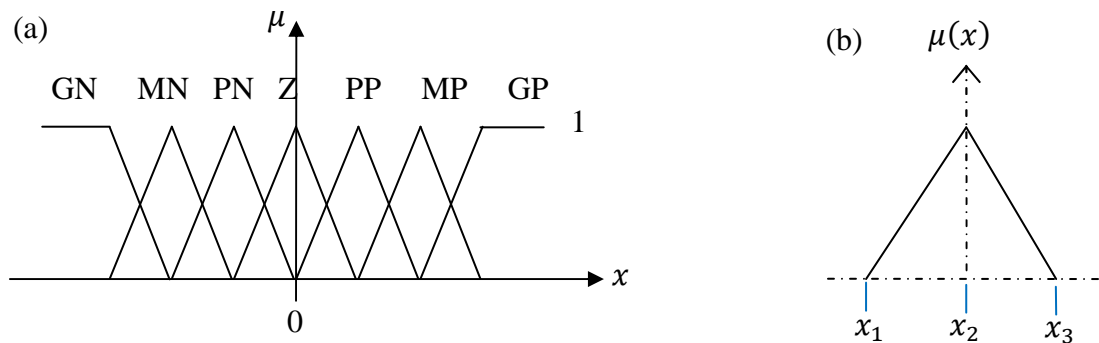


Figure II-13: Processus de fuzzification et détermination du degré d'appartenance

La variable x peut être la différence de puissance ou de vitesse entre deux itérations ($x = \Delta P$ ou $x = \Delta \Omega$).

2.4.2. Elaboration de la table des règles et processus d'inférence

Cette table résume l'ensemble des règles qui traduisent le raisonnement de l'opérateur (l'homme). Elle traduit les règles exprimées par le langage courant suivant [Mir05]:

- Si une grande augmentation de la vitesse entraîne une grande augmentation de la puissance, on continue d'augmenter fortement la vitesse de rotation ($\Delta \Omega = GP$) ;
- Si une grande augmentation de la vitesse entraîne une grande diminution de la puissance, on diminue fortement la vitesse de rotation ($\Delta \Omega = GN$) ;
- Si une grande augmentation de la vitesse entraîne une faible augmentation de la puissance (on est alors proche du PO) on augmente moyennement la vitesse de rotation ($\Delta \Omega = MP$) ;
- Si une petite diminution de la vitesse entraîne une augmentation moyenne de la puissance, on diminue moyennement la vitesse ($\Delta \Omega = MN$) ;
- S'il y a une augmentation de la puissance sans variation de la vitesse (augmentation de la vitesse du vent), on doit augmenter la vitesse de rotation ($\Delta \Omega = PP$) ;
- S'il y a une diminution de la puissance sans variation de la vitesse (due à la diminution de la vitesse du vent), on doit diminuer la vitesse de rotation ($\Delta \Omega = PN$) ;
- Si la variation de puissance est nulle suite à une augmentation ou une diminution de la vitesse de rotation, on ne fait pas varier la vitesse afin de stabiliser le point de fonctionnement sur le PO ($\Delta \Omega = Z$).

A l'aide de ces considérations, on peut dresser le tableau (II-2) suivant :

Tableau II-2 : Règles d'inférences

| Ω_{k+1}^{ref} | | $\Delta P = P_k - P_{k-1}$ | | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | | GN | MN | PN | Z | PP | MP | GP |
| $\Delta\Omega = \Omega_k - \Omega_{k-1}$ | GN | GP | GP | MP | Z | MN | GN | GN |
| | MN | GP | MP | PP | Z | PN | MN | GN |
| | PN | MP | PP | PP | Z | PN | PN | MN |
| | Z | GN | MN | PN | Z | PP | MP | GP |
| | PP | MN | PN | PN | Z | PP | PP | MP |
| | MP | GN | MN | PN | Z | PP | MP | GP |
| | GP | GN | GN | MN | Z | MP | GP | GP |

La détermination du degré d'appartenance des fonctions d'appartenance de sortie (mécanisme d'inférence) s'effectue à l'aide des opérateurs ET et OU de la logique floue qui correspondent aux opérateurs mathématiques MIN et MAX, respectivement, pour prendre en compte l'intersection ou l'union des ensembles flous ΔP et $\Delta\Omega$. Ainsi, on aura [Alt08, Mir05]:

$$\mu_{(\Delta P \text{ ET } \Delta\Omega)} = \min(\mu_{\Delta P}, \mu_{\Delta\Omega}) \quad \text{(II-23)}$$

$$\mu_{(\Delta P \text{ OU } \Delta\Omega)} = \max(\mu_{\Delta P}, \mu_{\Delta\Omega}) \quad \text{(II-24)}$$

Le tableau II-2 est composé de règles floues, utilisées en parallèle, qui sont toutes du type :

Si « condition 1 » **ET** « condition 2 » **Alors** « conclusion ».

L'implémentation de ces règles est réalisée à l'aide de l'opérateur MIN dans l'environnement MATLAB\ Simulink.

2.4.3. Défuzzification

Après la détermination du degré d'appartenance des fonctions d'appartenances de sortie, on procède à la défuzzification pour avoir finalement le pas de la vitesse de référence numériquement. La méthode retenue pour cette étape est celle du centre de gravité (parmi d'autres méthodes : moyenne des maximums et la méthode des maximums) [Bia06].

Sur la figure (II-14), on a : $\mu(\Delta\Omega_{k+1}^{ref} = PP) = 0.4$ et $\mu(\Delta\Omega_{k+1}^{ref} = MP) = 0.8$

On trouve :

$$\Delta\Omega_{k+1}^{ref} = \frac{0.8 MP + 0.4 PP}{0.8 + 0.4} = 0.5$$

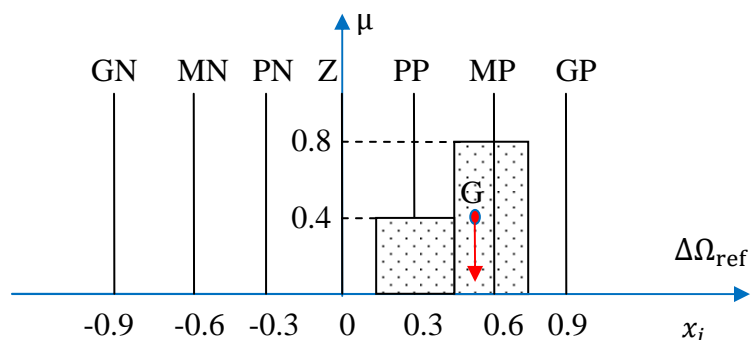


Figure II-14: Défuzzification par la méthode du centre de gravité

Dans le cas général, on utilise l'expression suivante [Bia06, Muy09]:

$$\Delta\Omega_{k+1}^{ref} = \frac{\sum_{i=1}^{49} (\mu_i x_i)}{\sum_{i=1}^{49} \mu_i} \tag{II-25}$$

2.4.4. Résultats de simulation et interprétations

Pour le même profil du vent utilisé par la méthode du gradient (figure II-11a), les résultats de simulation par la logique floue sont donnés sur les figures (II-15) et (II-16).

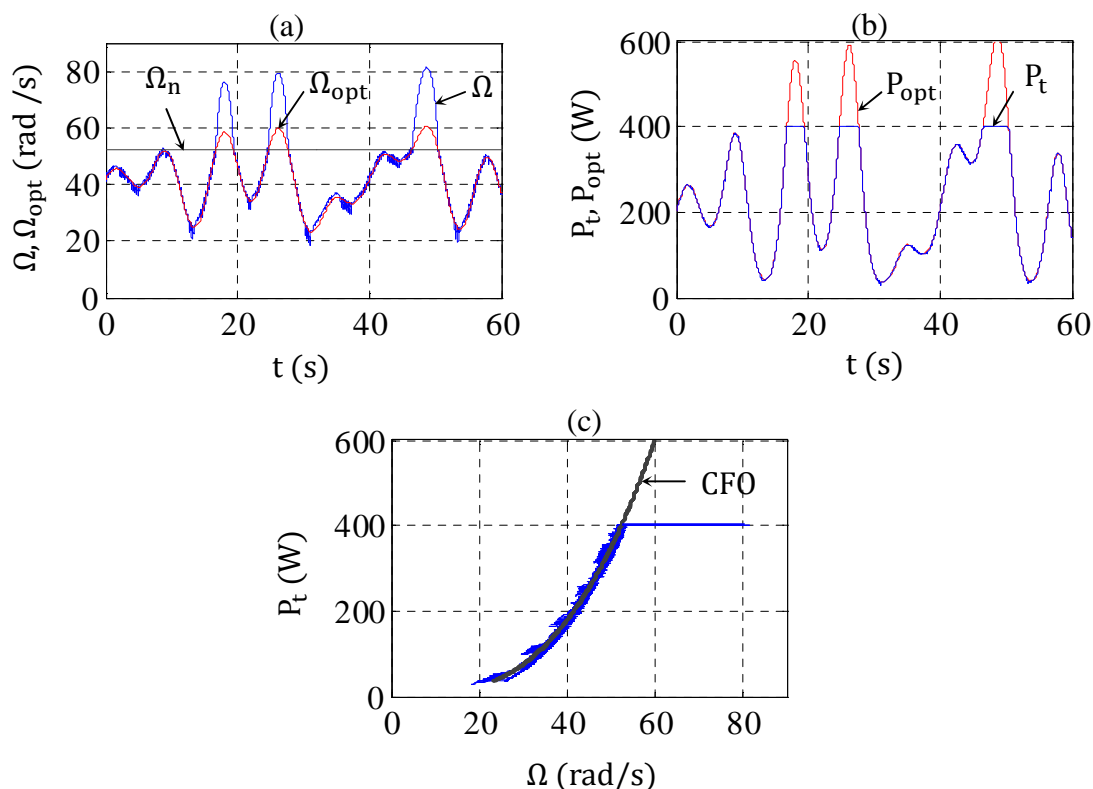


Figure II-15: Résultats de simulation par la logique floue : vitesse et puissance

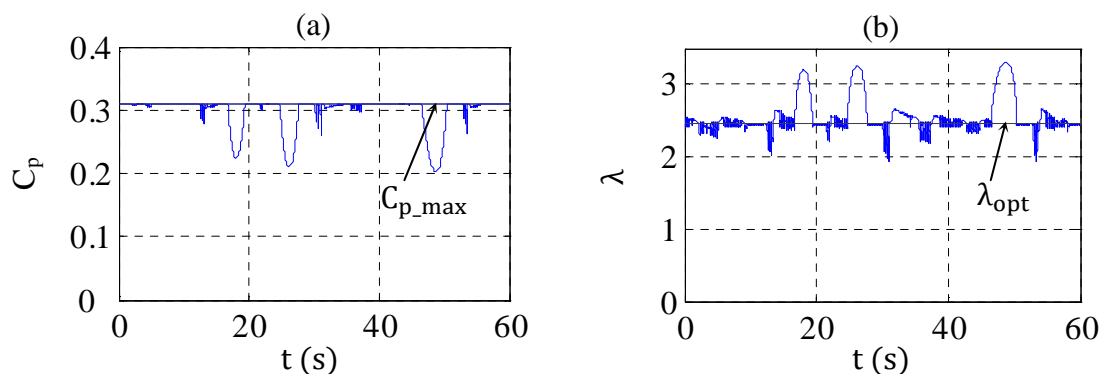


Figure II-16: Résultats de simulation par la logique floue : Coefficient de puissance et vitesse spécifique

La figure (II-15a, b) montre le suivi de la vitesse et de la puissance, calculés par l'algorithme de la logique floue, à leurs caractéristiques optimales correspondantes. Sur la figure (II-15c) on constate la diminution des oscillations autour de la caractéristique optimale par rapport au résultat obtenu par la méthode du gradient, mais au prix d'un calcul plus complexe.

Le coefficient de puissance et la vitesse spécifique sont maintenus à leurs valeurs optimales pour le fonctionnement en dessous de la vitesse nominale du vent (figure II-16a, b). Pour des vitesses du vent supérieures à la vitesse nominale, la limitation de puissance est réalisée aussi par la technique décrite dans la section (4.2) de ce chapitre. Cette limitation de puissance se traduit par une augmentation légère de la vitesse de rotation et de la vitesse spécifique avec une dégradation du coefficient de puissance, ce qui peut être constaté sur l'ensemble des allures présentées.

3. Limitation de la puissance captée par la turbine éolienne

Quand la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale de la turbine, la puissance doit être limitée en variant l'angle d'incidence α des pales en agissant sur la vitesse de rotation et/ou l'angle de calage β .

La diminution de l'angle d'incidence, correspondant à une augmentation de la vitesse de rotation et/ou de l'angle de calage, conduit à un processus aérodynamique appelé calage variable ou contrôle Pitch [Mun08, Rys08].

L'augmentation de l'angle d'incidence (faibles variations de la vitesse de rotation et / ou de l'angle de calage), mène à une diminution de la puissance aérodynamique par le processus appelé décrochage aérodynamique ou effet Stall [Mun08, Rys08].

La limitation de puissance à sa valeur nominale est possible, soit par le contrôle en vitesse de rotation de la turbine ou par action sur l'angle de calage des pales. Le générateur peut être contrôlé en vitesse ou en couple à l'aide des convertisseurs d'électronique de puissance. Le contrôle Pitch peut être réalisé en utilisant un système collectif ou individuel (en chaque pale) pour faire tourner les pales autour de leurs axes. La figure (II-17) illustre ces techniques de contrôle au niveau des pales [Rys08].

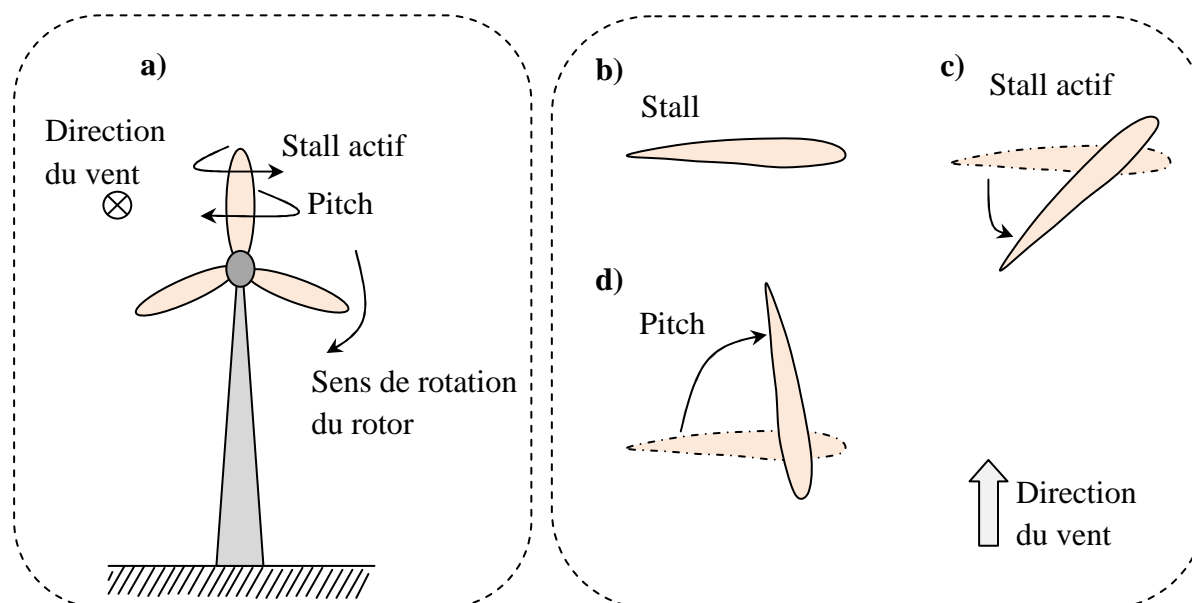


Figure II-17: Méthodes de limitation de puissance au niveau de la turbine

3.1. Système Stall passif

Cette technique est la plus simple, son élément clé est la conception spéciale du profil des pales. En effet, lorsque la vitesse du vent augmente on obtient l'effet Stall automatiquement (augmentation de l'angle d'incidence). Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, la puissance aérodynamique atteint une certaine limite maximale, et diminue progressivement jusqu'à ce que la turbine réagisse complètement à l'effet Stall (figure II-18).

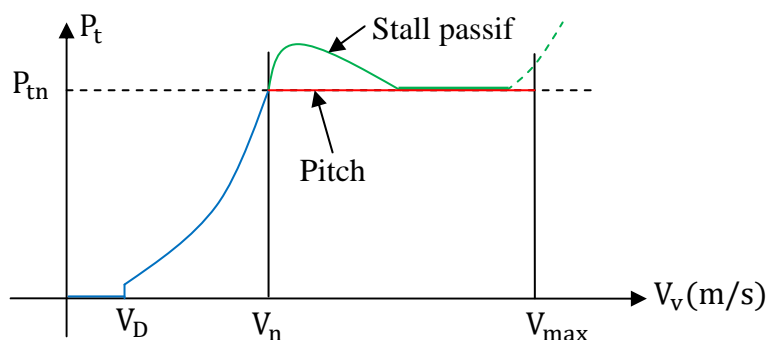


Figure II-18: Comparaison entre la technique Pitch et Stall passif

Néanmoins, pour les vents forts la puissance captée par l'éolienne devient incontrôlable, ce qui nécessite des freins d'urgence pour assurer la sécurité de la turbine.

3.2. Système Stall actif

Le contrôle Stall actif (appelé aussi Pitch négatif) réduit la puissance aérodynamique en diminuant l'angle de calage ; l'angle d'incidence dans ce cas augmente. Pour ce contrôle une petite variation de β est suffisante pour le maintien de la puissance nominale.

Cette technique permet de réduire considérablement le trajet du mécanisme d'orientation des pales par rapport au contrôle de type Pitch, ce qui est très avantageux de point de vue mécanique [Mun08].

3.3. Système Pitch actif

Il correspond à l'augmentation de l'angle de calage jusqu'à environ 35° de l'angle de référence. Par conséquent, le système d'orientation doit réagir rapidement avec une vitesse de variation de l'ordre de $5^\circ/\text{s}$ et dans les cas d'urgence jusqu'à $10^\circ/\text{s}$ [Lav05, Mun08, Muy09].

Le fonctionnement à vitesse variable impose la prise en compte de l'inertie des pales. En effet cette inertie est plus grande que l'inertie du générateur électrique. L'inertie du rotor permet de s'opposer aux variations de vitesse et de stocker l'énergie durant les phases d'accélération et de décélération de la turbine (figure II-19) [Mul01].

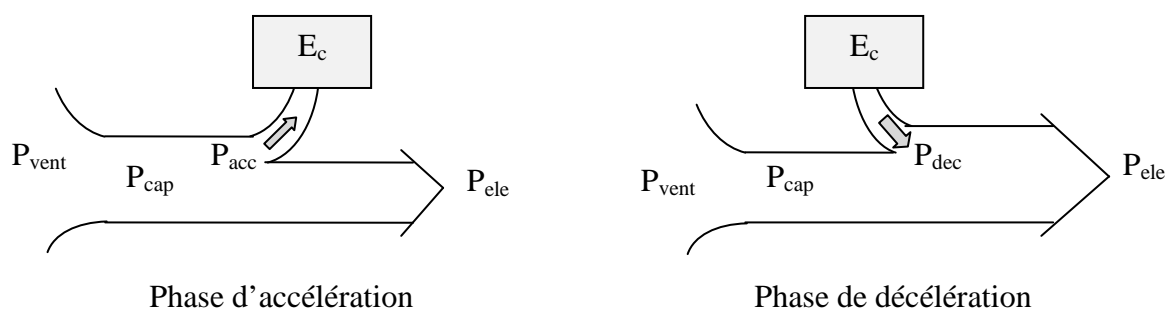


Figure II-19: Energie cinétique durant les phases d'accélération et de décélération de la turbine

Quant la puissance capturée P_{cap} est supérieure à la puissance électrique P_{ele} , la vitesse de rotation augmente et la différence entre P_{cap} et P_{ele} , qui donne les puissances d'accélération et de décélération P_{acc} , P_{dec} , augmente également [Mul01].

Avec le contrôle Pitch, la puissance capturée de l'énergie cinétique du vent peut être contrôlée par le mécanisme d'orientation des pales. L'accélération et la décélération résultent de la différence des puissances à l'entrée du générateur et de la turbine (théoriquement, pour une charge électrique constante, l'énergie de l'accélération et de la décélération peut être nulle si le mécanisme réagit rapidement de façon à avoir P_{cap} égale à P_{ele}) [Mul01]. Actuellement, les servomoteurs réagissent rapidement avec des temps de réponse allant de 0.2 à 1.5 s [Muy09].

4. Contrôle d'un SCEE basé sur la MSAP

On suppose que la vitesse du vent augmente linéairement depuis le démarrage jusqu'à la vitesse nominale. L'optimisation de puissance est réalisée durant le fonctionnement à charge partielle grâce à la technique MPPT. Tenant compte de ces conditions, le contrôle de la génératrice va déplacer continuellement la caractéristique de son couple C_g vers la droite jusqu'à ce qu'il atteigne la limite du fonctionnement à charge partielle (figure II-20).

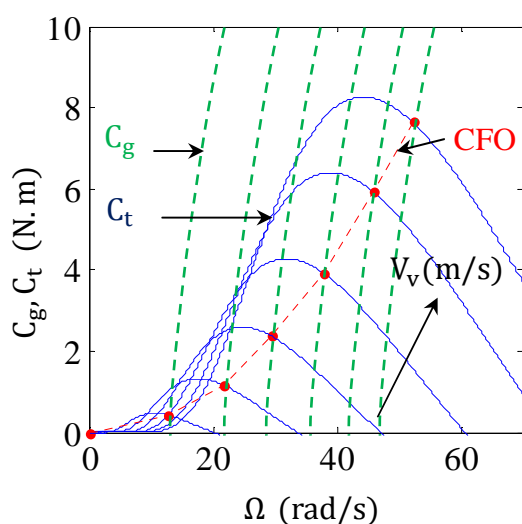


Figure II-20: Caractéristique de fonctionnement d'un SCEE sur le plan couple-vitesse

Si la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, il est nécessaire de changer le but du contrôle de l'optimisation à la limitation de puissance à sa valeur nominale, la contrainte $P_i(t) \leq P_n$ est imposée. Cela peut être réalisé en ramenant la turbine au régime où le coefficient de puissance peut être dégradé.

4.1. SCEE avec contrôle Stall

Avec un contrôle de type Stall durant le fonctionnement à pleine charge, le fonctionnement de la turbine éolienne depuis le démarrage est décrit par la trajectoire ABCD représentée sur la figure (II-21a) [Mun08].

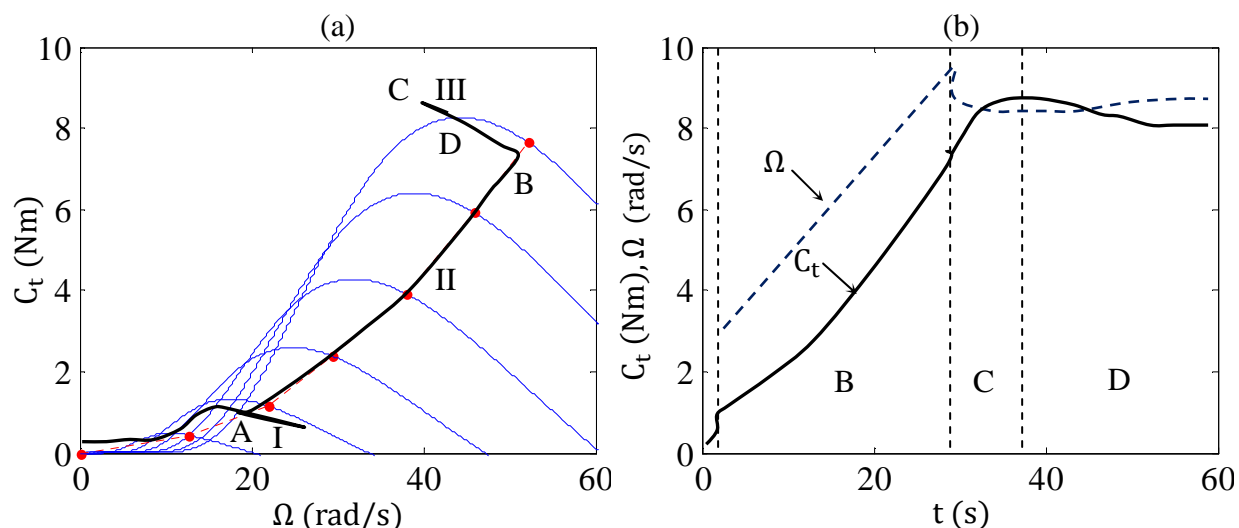


Figure II-21: Evolution du point de fonctionnement depuis le démarrage jusqu'à la limitation de puissance par l'effet Stall

La zone I de cette trajectoire correspond au régime de démarrage. La zone II, entre A et B, concerne l'optimisation de puissance. Dans la zone III, entre B, C et D, la puissance est maintenue constante.

Le coefficient de puissance est maintenu à sa valeur maximale par la stratégie MPPT pour la zone II. Mais durant le fonctionnement à pleine charge, il doit être diminué afin de limiter la puissance captée par la turbine éolienne. Les variations de la vitesse et du couple de la turbine sont représentées sur la figure (II-21b), elles montrent l'évolution du point de fonctionnement sur le segment B-C-D.

L'une des propriétés du contrôle Stall est que, si la condition $\Omega(t) \leq \Omega_n$ n'est pas opérationnelle sur la zone II, elle n'est pratiquement pas nécessaire sur la zone III. En effet, la vitesse de rotation peut augmenter jusqu'à une vitesse limite admissible, qui est sensiblement supérieure à la vitesse nominale de la turbine.

Dans le cas suivant, on considère que la vitesse de rotation obéit à la contrainte $\Omega(t) \leq \Omega_n$ dans la zone II. La figure (II-22) donne l'évolution du point de fonctionnement sur divers plans.

Sur la figure (II-22a, b) est représentée l'évolution du point de fonctionnement sur le plan $C_t=f(\Omega)$ et $\Omega=f(V_v)$. Le segment depuis l'origine jusqu'au point A correspond au démarrage. Sur le tronçon A-B, la turbine fonctionne sous le contrôle MPPT en dessous de la vitesse nominale de rotation, puis cette vitesse est atteinte et reste constante sur le segment B-C.

Finalement, le segment C-D-E correspond à un fonctionnement en pleine charge avec limitation de puissance.

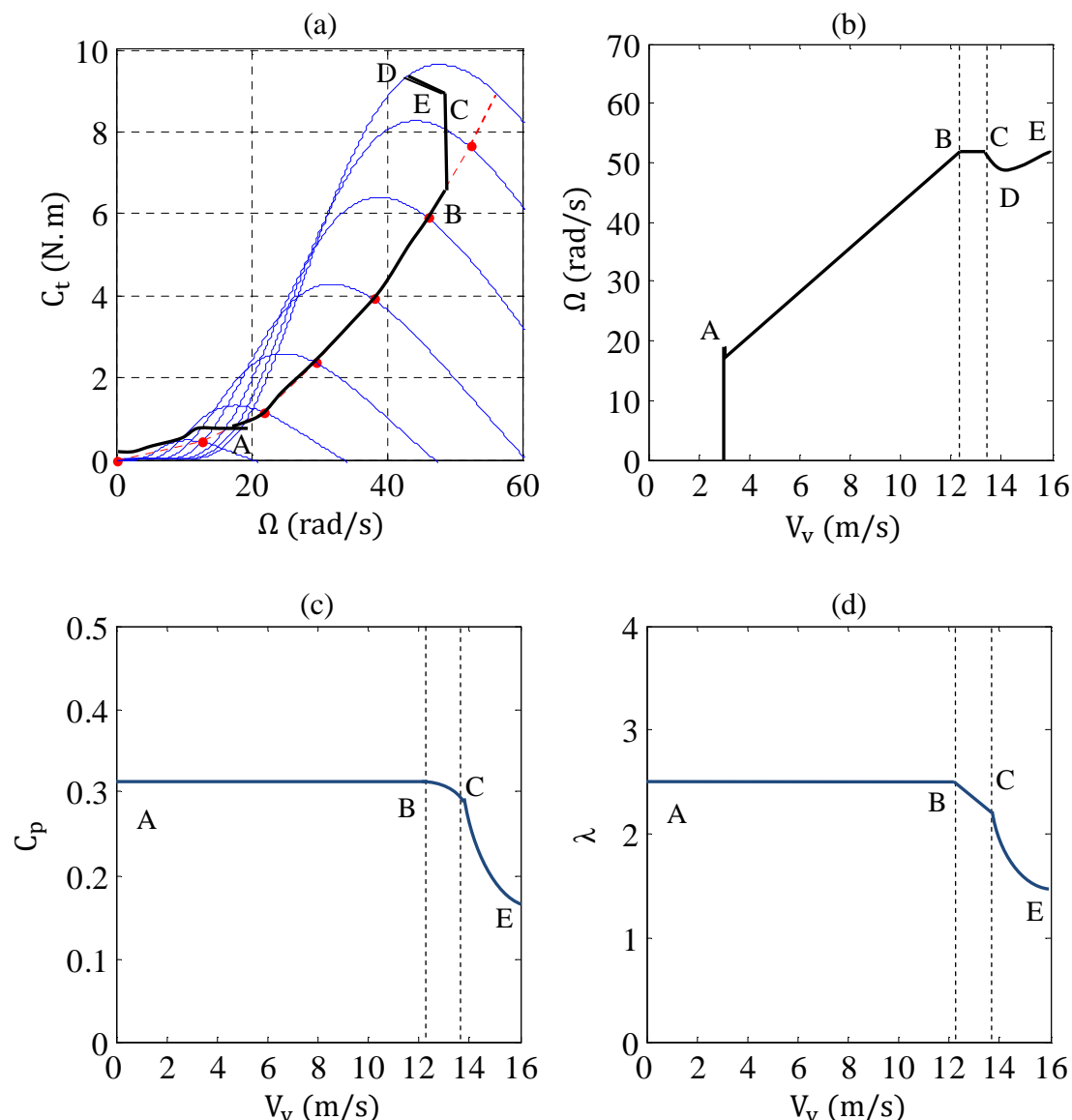


Figure II-22: Caractéristiques de fonctionnement d'une turbine éolienne avec contrôle MPPT et Stall avec limitation de la vitesse

L'évolution correspondante du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique est également présentée sur la figure (II-22c, d).

4.2. SCEE avec limitation de puissance en zone stable

Pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse nominale, le contrôle MPPT assure l'optimisation de la puissance captée. Au-delà de la vitesse nominale, la puissance extraite du vent est maintenue constante et la vitesse de rotation de la génératrice peut augmenter jusqu'à une certaine limite admissible (figure II-23c, d).

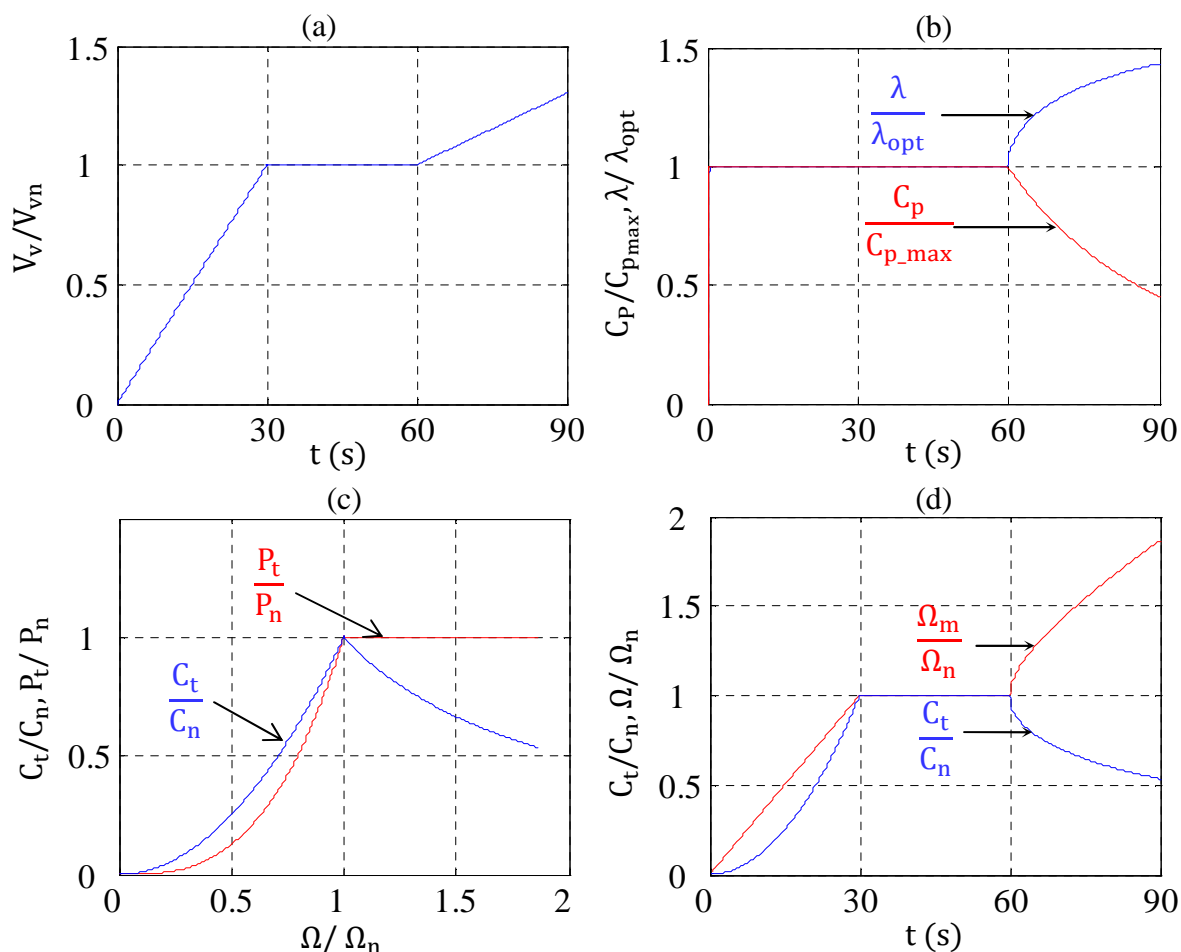


Figure II-23: Résultats de simulation d'une éolienne de 400 W avec limitation de puissance en zone stable

Sur le plan λ - C_p , cela correspond à un fonctionnement à des vitesses spécifiques supérieures à la vitesse spécifique optimale (figure II-23b). Le coefficient de puissance dans ce cas subit des variations moins rapides que dans le cas du contrôle Stall.

4.3. SCEE avec contrôle Pitch

4.3.1. Régulation de l'angle de calage par un correcteur PI

4.3.1.1. Principe de la régulation

Le mécanisme d'orientation des pales est modélisé par une fonction de transfert du premier ordre avec une constante de temps T_d . La boucle de régulation de l'angle de calage (figure II-24), est composée de deux boucles imbriquées, l'une contrôlant la vitesse de variation $\dot{\beta}$, l'autre contrôlant la position des pales [Lav05, Aim04]. L'angle de référence provient d'une boucle externe visant à réguler soit la vitesse de la turbine, soit la puissance mécanique générée.

Tant que la vitesse du vent n'atteint pas sa valeur nominale, le mécanisme d'orientation des pales n'intervient pas ($\beta = 0$). Au-delà, la boucle de régulation intervient et β peut varier entre 0 et 35° .

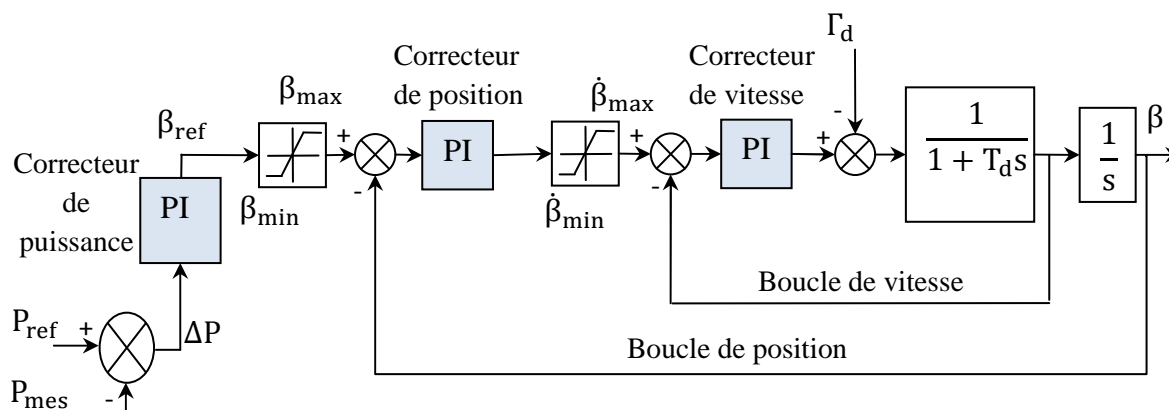


Figure II- 24: Schéma bloc de régulation de l'angle de calage des pales

La réponse à un échelon de 5° puis de 8° après 5 secondes (figure II-25) montre que le temps de réponse à 5% et de l'ordre de 0.5 s (les paramètres des régulateurs sont donnés en annexe A), le couple résistant Γ_d n'est pas pris en compte.

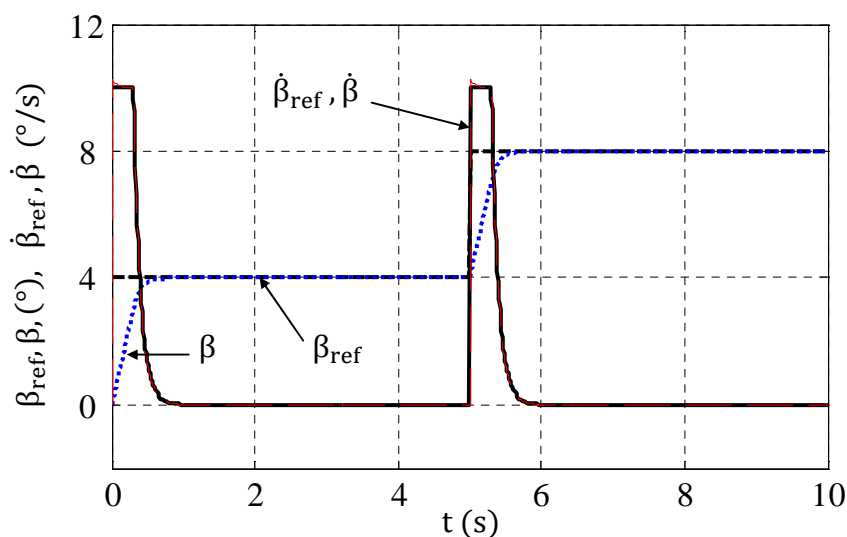


Figure II- 25: Réponse de la boucle de régulation de l'angle de calage des pales

4.3.1.2. Résultats de simulation et interprétations

Une simulation d'une turbine éolienne de 660 kW (voire annexe A) avec contrôle MPPT et asservissement de vitesse en charge partielle et limitation de puissance par contrôle Pitch en pleine charge, a donnée les résultats présentés sur la figure (II-26).

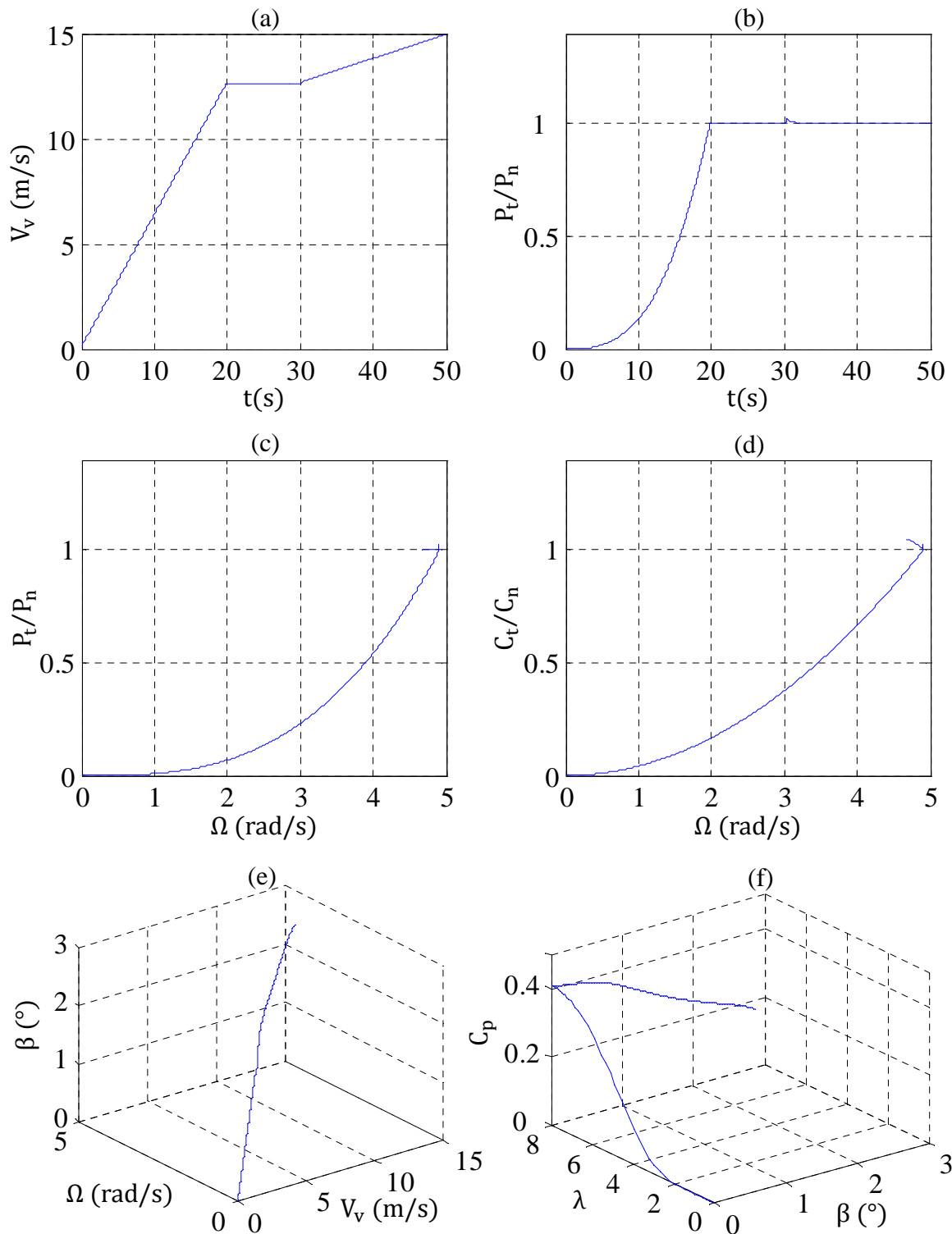


Figure II-26: Résultats de simulation d'une éolienne de 660 kW avec contrôle Pitch

L'intervention sur l'angle de calage des pales a permet de limiter la puissance à sa valeur nominale, en dégradant le coefficient de puissance (figure II-26b, e, f). La vitesse de rotation subit une légère diminution, compensée par une augmentation du couple (figure II-26c, d).

4.3.2. Régulation de l'angle de calage par la logique floue

4.3.2.1. Structure de la régulation

Dans le but d'améliorer les performances du fonctionnement de l'éolienne pour des vitesses du vent élevées, la logique floue peut s'avérer meilleure pour la régulation de l'angle de calage par rapport aux régulateur PI classique [Muy09]. La structure complète du contrôle de l'angle de calage par la LF est donnée sur la figure (II-27).

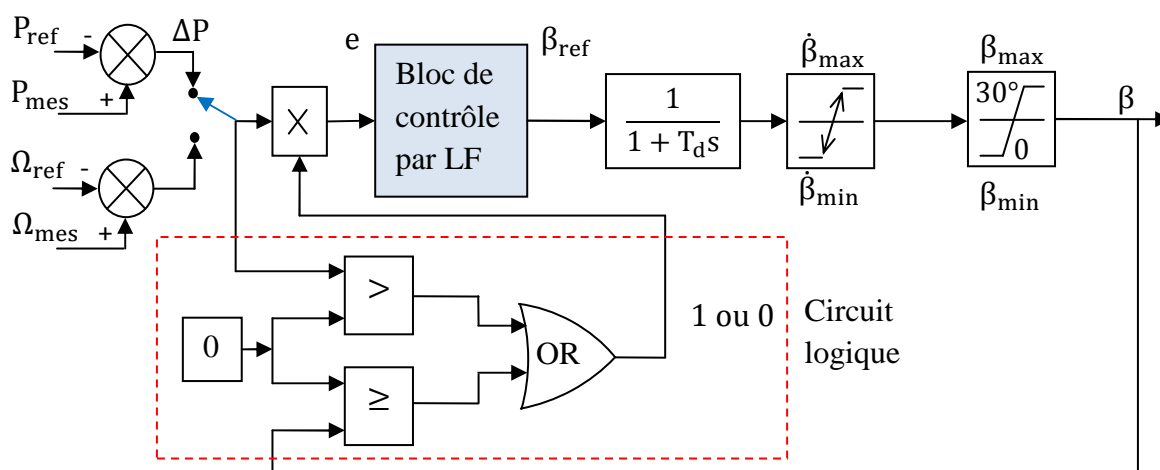


Figure II-27 : Régulation de l'angle de calage par logique floue

On peut utiliser un mode de contrôle basé sur la comparaison des puissances ou des vitesses de rotation, dans notre cas on a opté pour la comparaison des puissances.

Le fonctionnement du circuit logique est décrit par le tableau (II-3).

Tableau II-3 : Sortie du circuit logique

| | $\Delta P < 0$ | $\Delta P > 0$ |
|-------------|----------------|----------------|
| $\beta = 0$ | 0 | 1 |
| $\beta > 0$ | 1 | 1 |

4.3.2.2. Bloc de contrôle par logique floue

Les entrées du bloc de contrôle flou sont l'erreur e et la variation de l'erreur Δe , les étapes du calcul flou dans ce cas ne diffèrent pas du cas précédent (génération de la référence de la vitesse de rotation).

a. Fuzzification

Les variables linguistiques utilisés dans ce cas sont : GN (grand négatif), PN (petit négatif), Z (zéro), PP (petit positif), GP (grand positif). Le processus de fuzzification par des fonctions triangulaire est donné sur la figure (II-28).

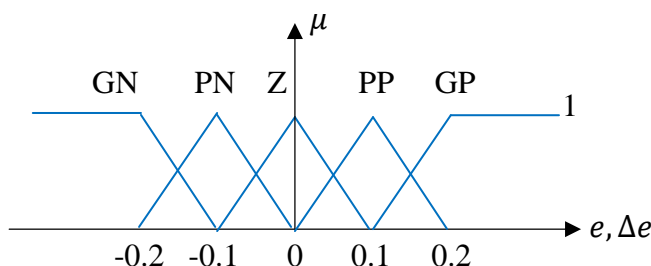


Figure II-28 : Processus de fuzzification des entrées

Le calcul des degrés d'appartenance s'effectue à l'aide de la relation (II-22), par les opérateurs MAX et MIN.

b. Table des règles

Les règles établies, qui sont au nombre de 25, sont résumées dans le tableau (II-4) [Muy09].

Tableau II-4 : Règles d'inférences

| $\beta_{ref}(k + 1)$ | | L'erreur $e(k)$ | | | | |
|-------------------------------------|-----------|-----------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | | GN | PN | Z | PP | GP |
| Variation de l'erreur $\Delta e(k)$ | GN | GN | GN | PN | PN | Z |
| | PN | GN | PN | PN | Z | PP |
| | Z | PN | PN | Z | PP | PP |
| | PP | PN | Z | PP | PP | GP |
| | GP | Z | PP | PP | GP | GP |

c. Défuzzification

A l'aide de la méthode du centre de gravité, l'expression de l'angle de référence pour chaque itération est donnée par la relation :

$$\beta_{k+1}^{ref} = \frac{\sum_{i=1}^{25} (\mu_i x_i)}{\sum_{i=1}^{25} \mu_i} \tag{II-26}$$

Tel que :

μ_i est le degré d'appartenance de la variable de sortie, déterminé selon l'expression (II-22),

x_i ($x_i \in \{-0.35, -0.15, 0, 0.3, 0.5\}$) sont les sommets des fonctions triangulaires de la variable de sortie.

4.3.2.3. Résultats de simulation et interprétations

Pour un vent variable selon l'allure présentée sur la figure (II-29), les résultats de simulation obtenus pour une éolienne de 660 kW (voir paramètres en annexe A) sont donnés sur les figures (II-30) et (II-31).

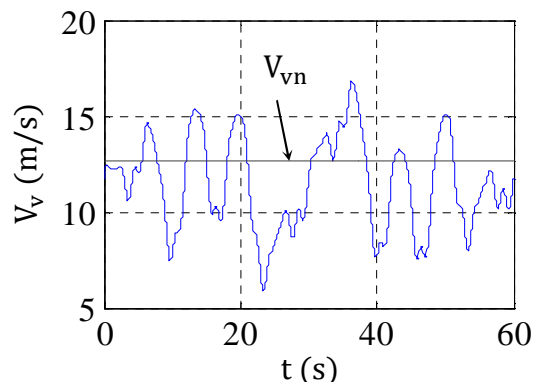


Figure II-29: Allure de la vitesse du vent

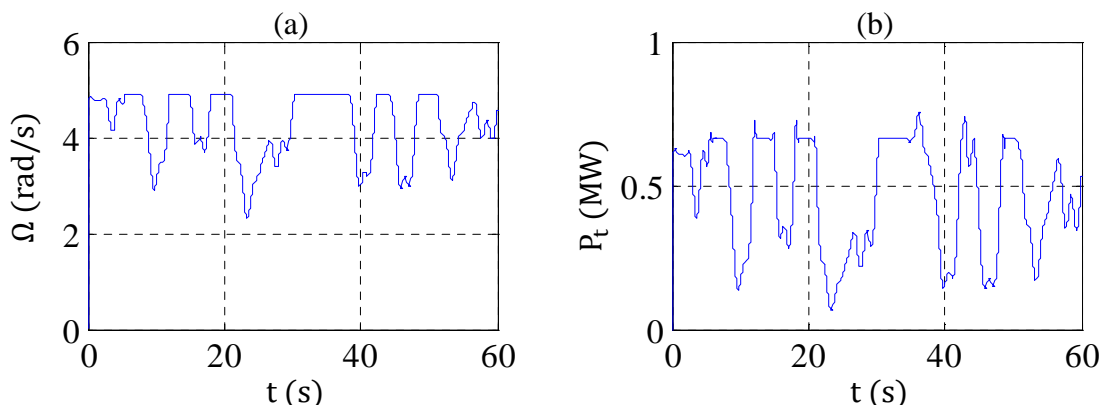


Figure II-30: Résultats de simulation du contrôle Pitch par logique floue : vitesse de rotation et puissance de la turbine

Pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse nominale (12.6 m/s), la technique MPPT assure l'optimisation de puissance captée par l'éolienne. Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, la boucle de régulation de l'angle de calage par logique floue réagit et la vitesse, ainsi que la puissance, sont limitées à leurs valeurs nominales (4.9 rad/s et 0.66 MW) (figure II-30a, b).

La limitation de puissance et de la vitesse est obtenue grâce une dégradation du coefficient de puissance (figure II-31a) par augmentation de l'angle de calage β (figure II-31c).

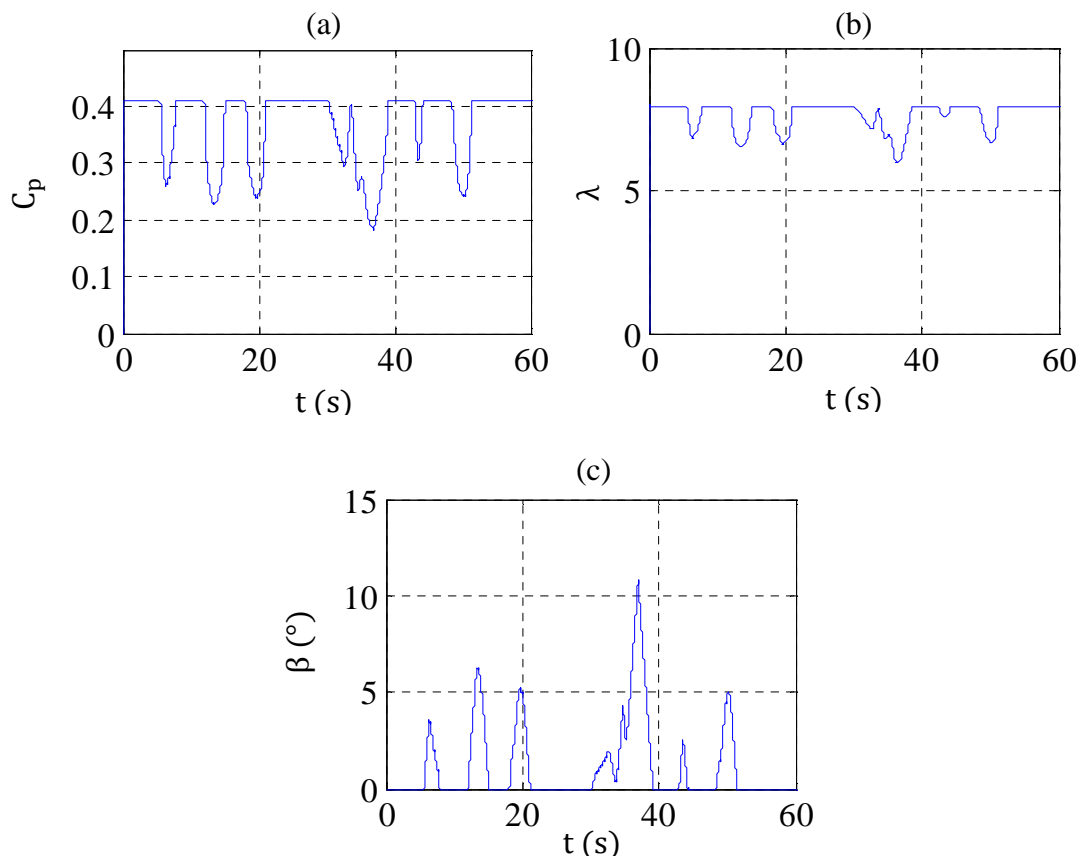


Figure II-31: Résultats de simulation du contrôle Pitch par logique floue : Coefficient de puissance, vitesse spécifique et angle de calage

Conclusion

Dans ce chapitre une modélisation de la turbine éolienne est effectuée avec une description de ces différentes zones de fonctionnement, principalement les zones d'optimisation et de limitation de la puissance captée par la turbine. A cet effet, différentes méthodes d'optimisation et de limitation sont présentées, y est compris des méthodes non linéaires (méthode du gradient et de la logique floue) et sont validées par des simulations numériques sous Matlab. Les résultats présentés montrent que la méthode du gradient, et encore mieux la méthode basée sur le calcul flou, peuvent réaliser l'optimisation de la puissance à partir des mesures de la vitesse de rotation mécanique et de la puissance seulement.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude et à la simulation numérique d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, utilisant la MSAP, raccordée au réseau électrique.

CHAPITRE III :**ETUDE DE CAS, AEROGENERATEUR CONNECTE
AU RESEAU ELECTRIQUE****Introduction**

Cette partie est dédiée à l'étude d'une chaîne de production éolienne de grande puissance basée sur une machine synchrone à aimants permanents sans multiplicateur de vitesse. Chaque élément de la chaîne de conversion est modélisé en vue d'une simulation globale du système de production raccordé au réseau électrique de distribution. Les résultats de simulation et interprétations sont donnés à la fin du chapitre.

1. Description de la chaîne de production

Comme le montre la figure (III-1), le système est composé d'une éolienne (tripale), d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP), des convertisseurs statiques suivis d'un filtre de raccordement au réseau électrique.

L'éolienne d'une puissance de 660 kW est contrôlée pour le fonctionnement dans les deux zones données sur la figure (II-4) ; c'est-à-dire, l'optimisation de puissance dans la zone II selon la courbes des maximas de puissance de la turbine éolienne et une limitation de puissance dans la zone III, sans et avec modification de l'angle de calage. Le réglage l'angle de calage est réalisé par l'algorithme de la logique floue.

La machine synchrone à aimants permanents à nombre de pôles élevé ($2p = 128$) permet un fonctionnement à faible vitesse de rotation, par conséquent, le multiplicateur de vitesse peut être supprimé.

Les convertisseurs d'électronique de puissance (redresseur et onduleur) sont contrôlés par la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) générée pour le redresseur à l'aide du contrôle par hystérésis des courants dans la machine. Pour l'onduleur côté réseau la MLI est générée à travers le contrôle des puissances active et réactive envoyées au réseau.

La tension du bus continu, en amont du convertisseur DC/AC, est maintenue constante à l'aide d'un hacheur commandé par le rapport cyclique α . Ce dernier est obtenu à partir d'une boucle de régulation utilisant un correcteur PI.

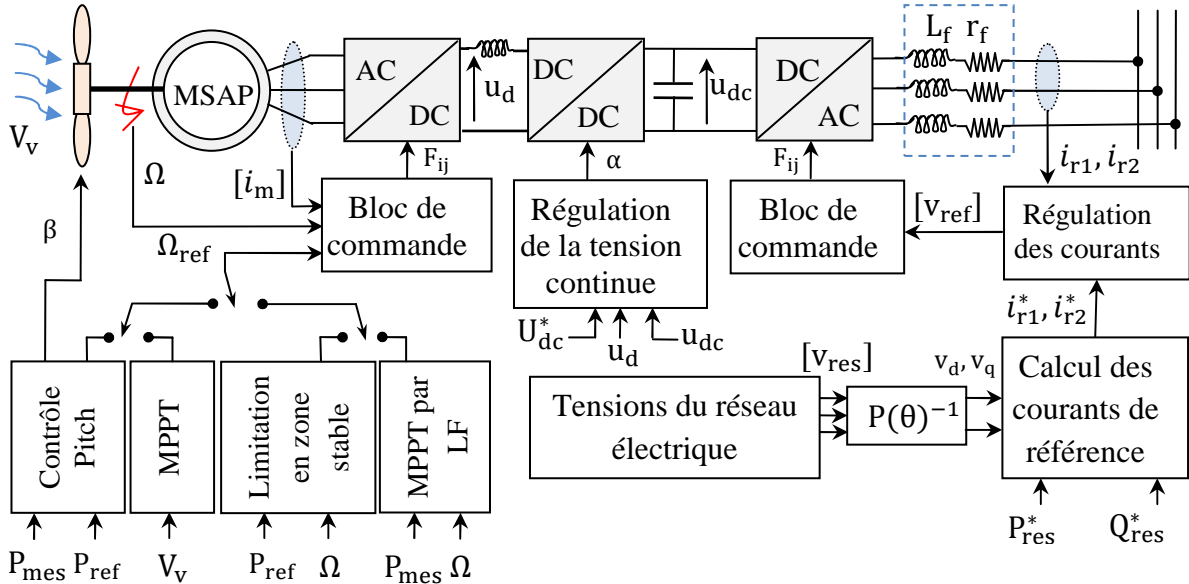


Figure III-1 : Schéma du système étudié et de la stratégie de sa commande

Les sections suivantes sont consacrées à la modélisation des éléments de la chaîne de production et la description des détails du schéma global de contrôle. Les résultats de simulation sont donnés à la fin du chapitre.

2. Modélisation du générateur synchrone en régime linéaire

Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné ont un stator identique. Les aimants permanents terres rares utilisés récemment dans les machines synchrones permettent d'avoir des couples massiques élevés. Nous considérons le cas d'une machine synchrone à pôles saillants, à rotor bobiné et sans amortisseurs. Le modèle de la MSAP à pôles lisses est obtenu par une simple modification des équations obtenues pour la machine considérée.

2.1. Equations initiales de la machine

Considérons une machine synchrone à $2p$ pôles sans amortisseurs (figure III-2). L'ensemble d'équations (électriques, magnétiques et mécanique) régissant le fonctionnement de la machine est donnée dans les sections suivantes.

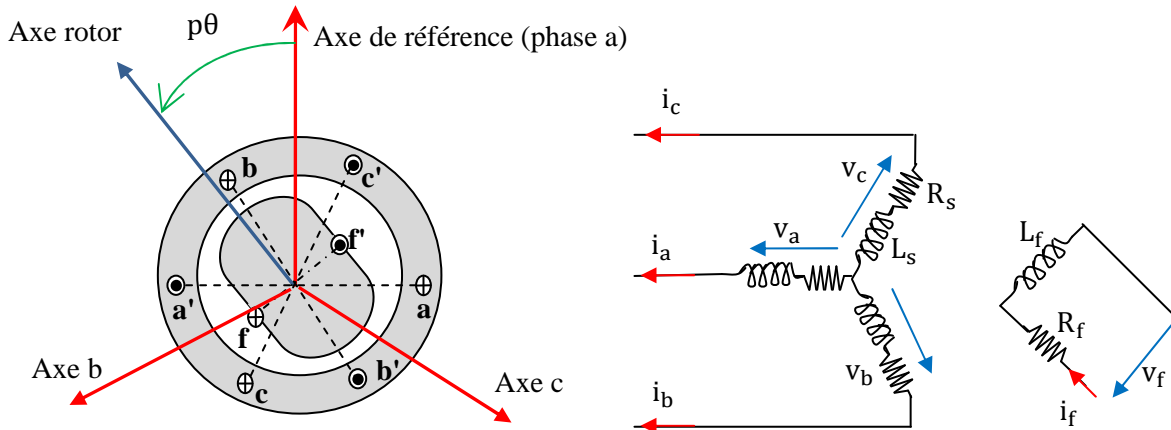


Figure III-2: Représentation symbolique de la machine synchrone

2.1.1. Equations des tensions

Sous forme matricielle, les tensions statoriques s'expriment par :

$$[V]_{abc} = R_s [i]_{abc} + \frac{d}{dt} [\Phi]_{abc} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

$$[V]_{abc} = [v_a \ v_b \ v_c]^t, \quad [i]_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^t, \quad [\Phi]_{abc} = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^t$$

La tension d'excitation est donnée par l'équation :

$$v_f = R_f i_f + \frac{d}{dt} \Phi_f \quad (\text{III-2})$$

2. 1.2. Equations des flux magnétiques

Les équations des flux s'écrivent :

$$[\Phi]_{abc} = [L_s] [i]_{abc} + [M_{sf}] i_f \quad (\text{III-3})$$

$$\Phi_f = L_f i_f + [M_{fs}] [i]_{abc} \quad (\text{III-4})$$

Dans une machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statorique est une fonction de la position θ du rotor, elle est de la forme [Pou95, Jea99, Moh03]:

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad (\text{III-5})$$

- La matrice $[L_{s0}]$ (à coefficients constants) a pour expression :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

- Les termes de la matrice $[L_{s2}(\theta)]$ sont fonction de l'angle $2p\theta$, elle est donnée par :

$$[L_{s2}](\theta) = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2p\theta) & \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2p\theta) \\ \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2p\theta) & \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III-7})$$

Le terme L_{s2} est constant.

La matrice de couplage stator-rotor a pour expression :

$$[M_{fs}] = [M_{sf}]^t = M_0 \left[\cos(p\theta) \quad \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{III-8})$$

2.1.3. Equation mécanique

L'équation mécanique dépend de la charge. Son expression la plus simple est :

$$C_{em} = J \frac{d}{dt} \Omega + C_m \quad (\text{III-9})$$

Où J est l'inertie totale des parties tournante, C_m le couple de charge, C_{em} le couple électromagnétique de la machine et Ω est la vitesse mécanique du rotor.

2.2. Transformation de Park

La représentation schématique de la machine synchrone équivalente au sens de Park est donnée sur la figure (III-3).

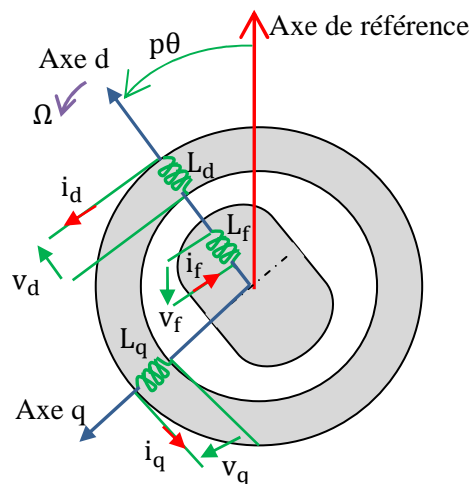


Figure III-3: Machine équivalente au sens de Park

2.2.1. Matrice de Park et relations de passage

On note le vecteur $[X]$ comme suit ($[X]$ peut être le vecteur des tensions, des flux ou des courants) :

$[X]_{dq} = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}$: Dans le repère tournant de Park lié au rotor.

La matrice de Park est donnée comme suit [Jea99]:

$$P(\varepsilon) = C R(\varepsilon) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & -\sin(\varepsilon) \\ \cos\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varepsilon - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\varepsilon + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \text{(III-10)}$$

Le passage du repère initial au repère de Park ou l'inverse se fait à l'aide des relations suivantes :

$$\begin{cases} [X]_{dq} = P^t(\varepsilon) [X]_{abc} \\ [X]_{abc} = P(\varepsilon) [X]_{dq} \end{cases} \quad \text{(III-11)}$$

2.2.2. Equations de la machine dans le repère de Park

a) Equations des flux

Les expressions des flux s'obtiennent en partant des équations (III-3) et (III-4) et en utilisant les relations de passage (III-11) (on prend $\varepsilon = p\theta$):

$$\begin{cases} \Phi_d = \left(L_{s0} - M_{s0} + \frac{3}{2}L_{s2}\right) i_d + M i_f \\ \Phi_q = \left(L_{s0} - M_{s0} - \frac{3}{2}L_{s2}\right) i_q \\ \Phi_f = M i_d + L_f i_f \end{cases} \quad \text{(III-12)}$$

$$\text{Avec } M = \sqrt{\frac{3}{2}} M_0$$

On constate que le découplage entre les axes est réalisé et l'angle θ n'apparaît plus dans les équations des flux. Les expressions des inductances directe et quadratique (L_d et L_q) sont exprimées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} L_d = (L_{s0} - M_{s0}) + \frac{3}{2}L_{s2} \\ L_q = (L_{s0} - M_{s0}) - \frac{3}{2}L_{s2} \end{cases} \quad \text{(III-13)}$$

b) Equations des tensions

A l'aide des équations (III-1), (III-2) et des relations de passage (III-11), on obtient les équations des tensions comme suit :

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d - p\Omega\Phi_q + \frac{d}{dt}\Phi_d \\ v_q = R_s i_q + p\Omega\Phi_d + \frac{d}{dt}\Phi_q \\ v_f = R_f i_f + \frac{d}{dt}\Phi_f \end{cases} \quad \text{(III-14)}$$

c) Expression du couple électromagnétique

La puissance est conservée lors du passage du repère initial au repère de Park, son expression est la suivante :

$$P = v_f i_f + (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) = v_f i_f + (v_d i_d + v_q i_q) \quad \text{(III-15)}$$

Le développement de cette expression donne les différents termes, qui correspondent aux pertes Joule, à la puissance électromagnétique emmagasinée dans les bobinages et la puissance mécanique convertie, qui a pour expression :

$$P_{mec} = p\Omega(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad \text{(III-16)}$$

L'équation du couple électromagnétique est donc :

$$C_{em} = \frac{P_{mec}}{\Omega} = p(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad \text{(III-17)}$$

Ou encore :

$$C_{em} = p[(L_d - L_q)i_d + M i_f]i_q \quad \text{(III-18)}$$

On introduisant l'équation (III-18) dans l'équation mécanique (III-9), on obtient :

$$J \frac{d}{dt}\Omega = p[(L_d - L_q)i_d + M i_f]i_q - C_m \quad \text{(III-19)}$$

2.3. Modèle d'état de la machine synchrone à aimants permanents

Dans le cas de la machine synchrone à aimants permanents (excitation constante), La troisième expression (tension d'excitation) du système d'équations (III-14) est inutile. Il suffit de poser :

$$M i_f = \Phi_f \quad \text{(III-20)}$$

Ainsi les équations des flux direct et quadratique deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_f \\ \Phi_q = L_q i_q \\ \Phi_f = \text{constant} \end{cases} \quad \text{(III-21)}$$

En introduisant les expressions des flux (III-21) dans les équations de tensions (III-14), on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p\Omega \begin{bmatrix} 0 & -L_q \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (\text{III-22})$$

Tel que : $[e]_{dq}$ représente les forces contre électromotrices directe et quadratique, proportionnelles à la vitesse Ω :

$$\begin{cases} e_d = 0 \\ e_q = p\Phi_f\Omega \end{cases} \quad (\text{III-23})$$

Le choix de i_d et i_q comme variables d'état dans l'équation (III-22), nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R_s}{L_d} i_d + p \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega + \frac{1}{L_d} v_d \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R_s}{L_q} i_q - p \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega - p \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega + \frac{1}{L_q} v_q \end{cases} \quad (\text{III-24})$$

Nous considérons une machine à rotor lisse, à cet effet la matrice $[L_{s2}(\theta)]$ est nulle et $L_d = L_q$, l'équation du couple (III-18) se simplifie en :

$$C_{em} = p\Phi_f i_q \quad (\text{III-25})$$

En tenant compte de l'équation mécanique (III-19), l'équation différentielle en vitesse mécanique sera :

$$\frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} (p\Phi_f i_q - C_m) \quad (\text{III-26})$$

La vitesse mécanique du rotor est exprimée en fonction de la position du rotor par l'équation :

$$\Omega = \frac{d}{dt} \theta \quad (\text{III-27})$$

Finalement, on obtient le modèle d'état avec i_d, i_q, Ω et θ comme variables :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ \Omega \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + p \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q - p \frac{L_d}{L_q} i_d \Omega - p \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega \\ \frac{1}{J} p\Phi_f i_q - \frac{1}{J} C_m \\ \Omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} \quad (\text{III-28})$$

3. Stratégie de commande de la MSAP

3.1. Principe de la commande

En reprenant l'équation (III-18), on constate que lorsque le courant i_d est nul, le couple devient proportionnel au courant i_q , en effet :

$$C_{em} = p\Phi_f i_q \quad \text{(III-29)}$$

Cela permet d'envisager une commande en couple de la machine par un asservissement à zéro du courant direct. Le courant quadratique de référence I_q^* est obtenu par la boucle de régulation de la vitesse de rotation de la génératrice (par un régulateur PI dont les paramètres sont donnés en annexe A). Il s'agit d'un pilotage vectoriel de la MSAP qui nécessite la connaissance de la position du vecteur flux rotorique. Elle peut être obtenue grâce à la mesure de la position angulaire du rotor à l'aide d'un capteur de position [Mir05], ou à partir d'une estimation analytique [Nah01, Ros09]. L'annulation du courant direct, qui correspond à l'alignement du flux d'excitation sur l'axe direct fait que l'angle δ entre le vecteur force électromotrice E_s de la machine et son courant I_s est nul (figure III-4), ce qui ne permet pas d'avoir un facteur de puissance unitaire [Mir05].

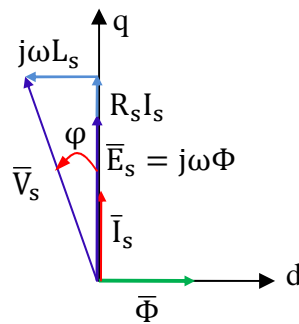


Figure III-4: Diagramme vectoriel d'une phase statorique

Le schéma de la figure (III-5) donne le principe de la commande adoptée pour la génération des signaux de commande du redresseur.

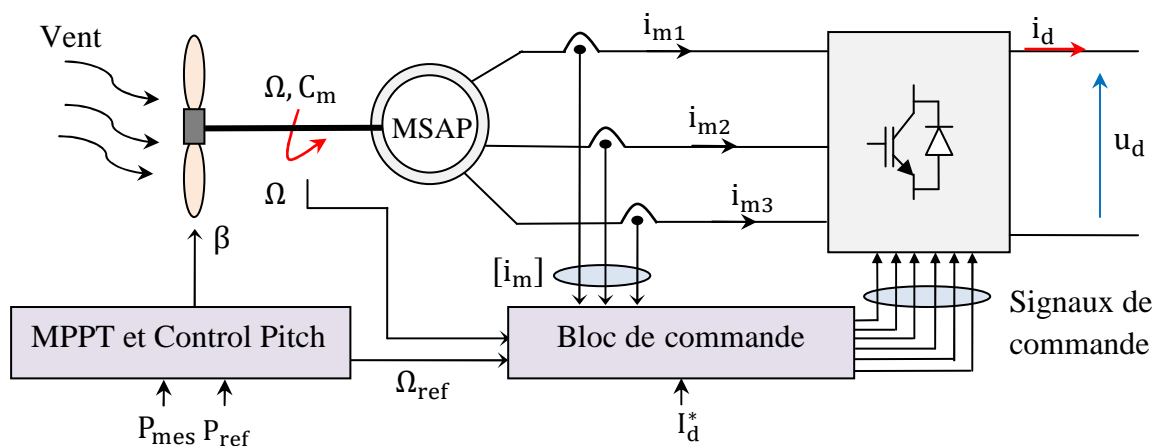


Figure III-5: Principe de la commande du redresseur (côté machine)

3.2. Régulation des courants

Pour la régulation des courants, on a fait appel aux régulateurs à hystérésis, ils maintiennent l'onde du courant dans une fourchette définie au préalable autour de la valeur de référence. Si le courant atteint les limites de la bande, on aura en sortie un signal logique (1 ou 0) pour l'interrupteur haut d'un bras du convertisseur (figure III-6). C'est-à-dire, pour $j = 1, 2, 3$:

$$\begin{cases} F_j = 1 & \text{si } i_{mj} < i_{mj}^* - \Delta i \\ F_j = 0 & \text{si } i_{mj} > i_{mj}^* + \Delta i \end{cases} \quad \text{(III-30)}$$

Tel que Δi est la bande d'hystérésis définie dans le régulateur.

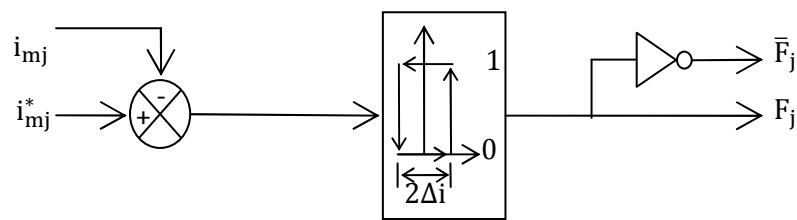


Figure III-6: Régulation hystérésis des courants

4. Modèle mathématique du convertisseur MLI

Le convertisseur statique est un élément clé dans la chaîne de conversion d'énergie, l'utilisation d'interrupteurs totalement commandables (commutation forcée) permet le contrôle des puissances active et réactive du côté de la machine comme du côté du réseau. La figure (III-7) représente un convertisseur à six interrupteurs commandés.

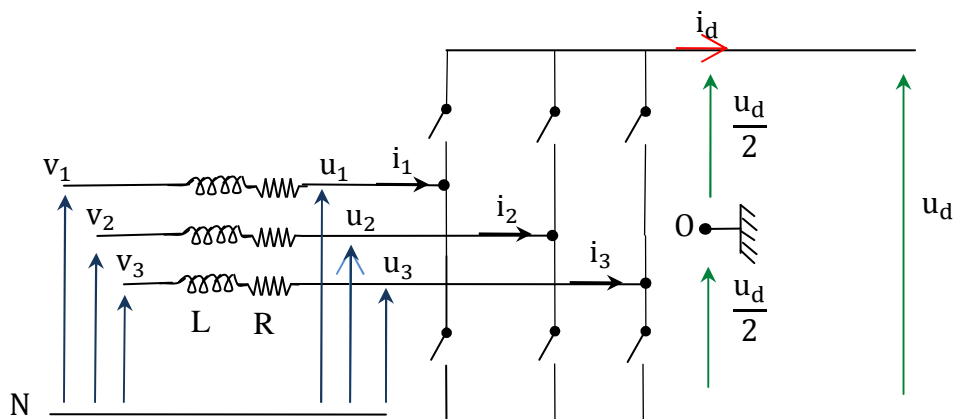


Figure III-7: Schéma de principe du convertisseur statique

Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un IGBT et d'une diode en antiparallèle. Il permet un fonctionnement à fréquence fixe (côté réseau) au variable (côté machine). Les tensions v_1 , v_2 et v_3 représentent les forces

contre électromotrices de la MSAP ou les tensions du réseau. Les éléments (R,L) représentent la résistance et l'inductance de la machine ou celle du filtre du raccordement au réseau.

Les équations électriques relatives au schéma s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} v_1 - u_1 = L \frac{di_1}{dt} + R i_1 \\ v_2 - u_2 = L \frac{di_2}{dt} + R i_2 \\ v_3 - u_3 = L \frac{di_3}{dt} + R i_3 \end{cases} \quad \text{(III-31)}$$

$$i_d = \sum_{j=1}^3 (F_j i_j) \quad \text{(III-32)}$$

F_j désigne la fonction de commutation relative à l'interrupteur haut de chaque bras du convertisseur ($j=1, 2,3$), elle est obtenue à la sortie des régulateur à hystérésis (MLI à hystérésis) ou par la MLI triangulo-sinusoidale.

En exprimant les tensions de phase par rapport au point milieu O et en considérant un système triphasé équilibré, on aboutit au modèle mathématique du convertisseur [Cap02, Gom05]:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \frac{u_d}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad \text{(III-33)}$$

5. Régulation de la tension du bus continu

La tension continue, en amont du convertisseur DC/AC, est maintenue constante à sa valeur de référence à l'aide d'un hacheur survolteur. La commande du hacheur est obtenue à partir de la boucle de régulation de la tension u_{dc} . Le circuit électrique du bus continu est donné par la figure (III-8).

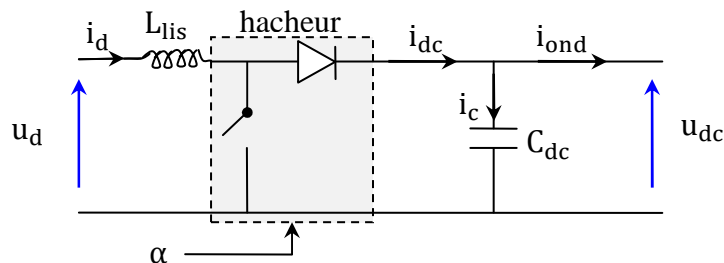


Figure III-8: Bus continu avec un hacheur survolteur

Les relations entre les courants et les tensions en amont et en aval du hacheur sont données par les expressions suivantes (α est le rapport cyclique du hacheur) :

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{1}{1-\alpha} u_d \\ i_{dc} = (1-\alpha) i_d \end{cases} \quad \text{(III-34)}$$

Les équations électriques en aval du hacheur s'expriment par les relations suivantes :

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (i_{dc} - i_{ond}) \quad \text{(III-35)}$$

$$i_c = i_{dc} - i_{ond} \quad \text{(III-36)}$$

L'inversion directe de l'équation (III-35) donne le courant I_{ond}^* de référence qui s'exprime comme suit [Ham08]:

$$I_{ond}^* = i_{dc} - PI(s)(U_{dc}^* - u_{dc}) \quad \text{(III-37)}$$

U_{dc}^* est la tension continue de référence.

On peut considérer la fonction de transfert entre les courants I_{ond}^* et i_{ond} du premier ordre avec une dynamique très élevée pour la synthèse du correcteur ; parce que la dynamique du courant est en générale plus rapide que celle de la tension [Ham08]. Le schéma global de régulation est donné sur la figure (III-9), les paramètres figurant sur le schéma sont donnés en annexe A.

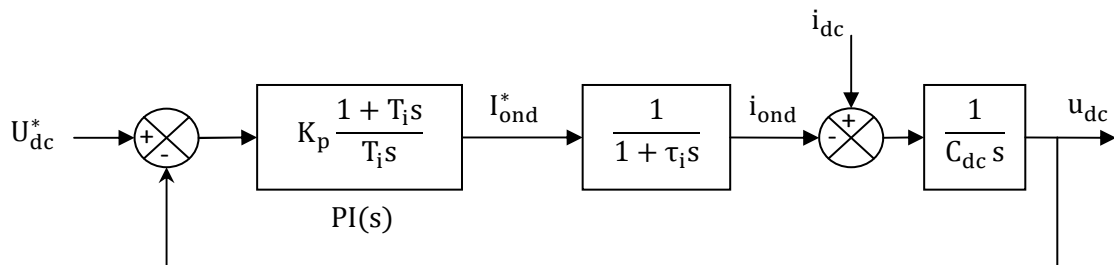


Figure III-9 : Régulation de la tension du bus continu

La puissance active est exprimée par le produit du courant continu par la tension comme suit :

$$P_{dc} = u_{dc} i_{dc} \quad \text{(III-38)}$$

6. Commande de l'onduleur du côté réseau électrique

La commande de l'onduleur côté réseau a pour but d'avoir des courants et des tensions qui ont des formes d'ondes acceptables (aussi proche de la sinusoïde que possible) et assurer un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire. Par conséquent, la puissance réactive

de référence est nulle et la puissance active correspond à la puissance optimale de l'éolienne. Le schéma de la figure (III-10) donne la stratégie de commande adoptée pour l'onduleur.

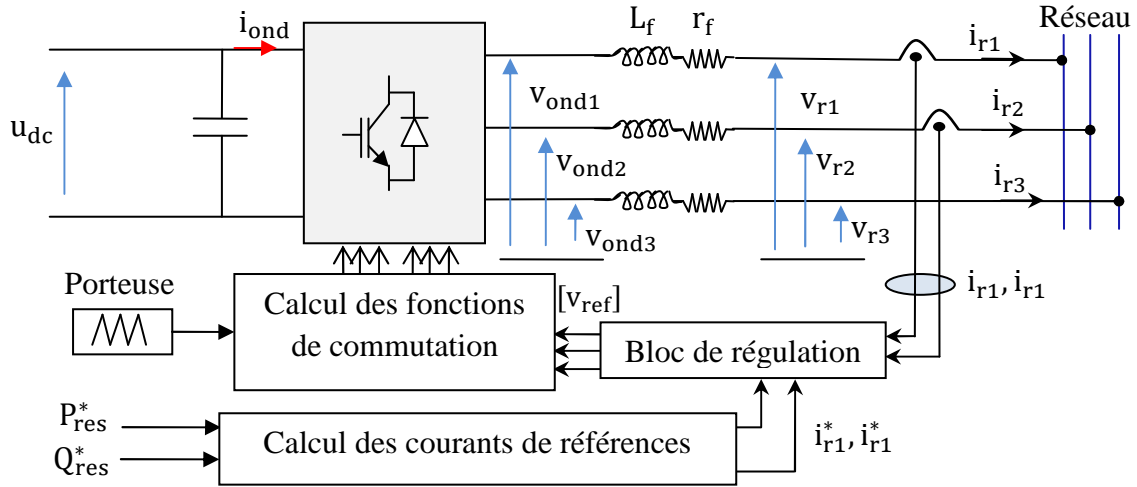


Figure III-10: Commande de l'onduleur du côté réseau électrique

6.1. Régulation des courants

Les équations électriques en aval de l'onduleur sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} v_{\text{ond1}} = v_{r1} + r_f i_{r1} + L_f \frac{d}{dt} i_{r1} \\ v_{\text{ond2}} = v_{r2} + r_f i_{r2} + L_f \frac{d}{dt} i_{r2} \\ v_{\text{ond3}} = v_{r3} + r_f i_{r3} + L_f \frac{d}{dt} i_{r3} \end{cases} \quad \text{(III-39)}$$

On considère un système de tensions triphasé équilibré, par conséquent on peut écrire :

$$i_{r1} + i_{r2} + i_{r3} = 0 \quad \text{(III-40)}$$

Donc

$$i_{r3} = -(i_{r1} + i_{r2}) \quad \text{(III-41)}$$

En introduisant l'opérateur de Laplace dans les deux premières équations du système (III-39), les courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} I_{r1} = \frac{1}{r_f + L_f s} (V_{\text{ond1}} - V_{r1}) \\ I_{r2} = \frac{1}{r_f + L_f s} (V_{\text{ond2}} - V_{r2}) \end{cases} \quad \text{(III-42)}$$

En partant du modèle mathématique de l'onduleur (équation III-33), on définit les fonctions de conversion m_1 et m_2 comme suit [Aim04, Ham08]:

$$[m_1 \ m_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} [F_1 \ F_2 \ F_3]^t \quad \text{(III-43)}$$

Tel que : $m_1, m_2 \in \{-1, 0, 1\}$

Les tensions composées modulées dans ce cas sont exprimées par :

$$\begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{pmatrix} = U_{dc} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} \quad (\text{III-44})$$

Tel que :

$$\begin{cases} U_{13} = v_{ond1} - v_{ond3} \\ U_{23} = v_{ond2} - v_{ond3} \end{cases} \quad (\text{III-45})$$

Les tensions simples modulées peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{pmatrix} v_{ond1} \\ v_{ond2} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_{13} \\ U_{23} \end{pmatrix} \quad (\text{III-46})$$

La qualité d'onde des tensions modulées dépend des performances de la régulation de la tension du bus continu. Les tensions de références sont obtenues par inversion direct de la relation (III-46), ce qui donne **[Ham08]**:

$$\begin{pmatrix} U_{13}^* \\ U_{23}^* \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_{ond1}^* \\ v_{ond2}^* \end{pmatrix} \quad (\text{III-47})$$

Les tensions simples de références, sont exprimées par la relation suivante **[Ham08]**:

$$\begin{pmatrix} v_{ond1}^* \\ v_{ond2}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{f1}^* \\ v_{f2}^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \end{pmatrix} \quad (\text{III-48})$$

La régulation des courants envoyés au réseau, donne à la sortie des PI les tensions de références v_{f1}^* et v_{f2}^* , en effet **[Ham08]**:

$$\begin{pmatrix} v_{f1}^* \\ v_{f2}^* \end{pmatrix} = \text{PI}(s) \begin{pmatrix} i_{r1}^* - i_{r1} \\ i_{r2}^* - i_{r1} \end{pmatrix} \quad (\text{III-49})$$

La boucle de régulation du courant réseau est donnée sur la figure (III-11).

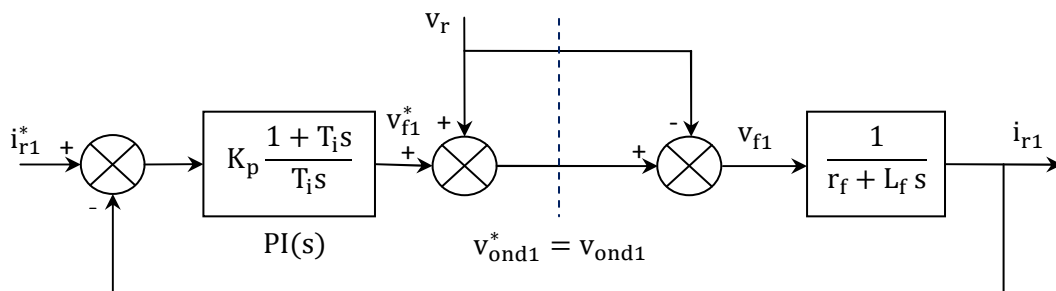


Figure III-11: Régulation du courant envoyé au réseau

Pour la synthèse des correcteurs PI, on respecte l'hypothèse suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{ond1}^* \\ v_{ond2}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ond1} \\ v_{ond2} \end{pmatrix} \quad \text{(III-50)}$$

Les paramètres des régulateurs et les détails de leur calcul sont donnés en annexe A.

6.2. Calcul des courants de références

La puissance réactive de référence est imposée nulle, en vue d'un fonctionnement à facteur de puissance unitaire du côté réseau électrique :

$$Q_{res}^* = 0 \quad \text{(III-51)}$$

La référence de la puissance active injectée au réseau correspond à la puissance aérodynamique optimale obtenue par la technique MPPT :

$$P_{res}^* = P_{opt} \quad \text{(III-52)}$$

Pour la prise en compte des pertes dans la chaîne de conversion, on peut introduire un rendement approximatif, qui n'est basé sur aucun calcul préalable, ainsi la puissance de référence devienne :

$$P_{res}^* = \eta P_{opt} \quad \text{(III-53)}$$

Les puissances active et réactive sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} P = v_d i_d + v_q i_q \\ Q = v_q i_d - v_d i_q \end{cases} \quad \text{(III-54)}$$

Les courants de références du réseau électrique, exprimés dans le référentiel de Park, sont donnés par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} i_{rd}^* \\ i_{rq}^* \end{pmatrix} = \frac{1}{v_{rq}^2 + v_{rd}^2} \begin{pmatrix} P_{res}^* & -Q_{res}^* \\ Q_{res}^* & P_{res}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{pmatrix} \quad \text{(III-55)}$$

7. Résultats de simulation et interprétations

Une simulation de la chaîne complète sous Matlab\ Simulink est effectuée, les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures (III-13)-(III-17). Les paramètres de toute la chaîne sont donnés en annexe A. La vitesse du vent est variable autour de la vitesse nominale V_{vn} (12.6 m/s) selon le profil présenté sur la figure (III-12). Il présente six intervalles de fonctionnement au dessus de la vitesse nominale.

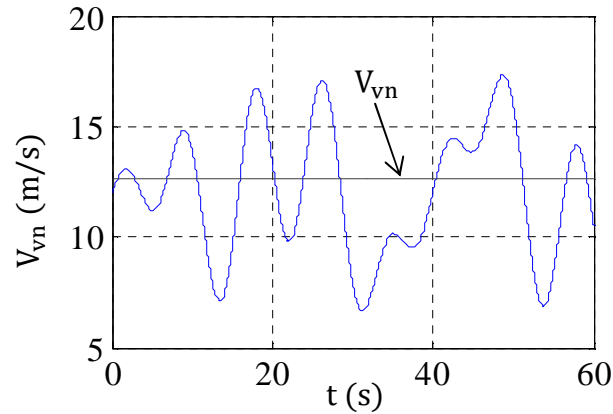


Figure III-12: Allure de la vitesse du vent

Le coefficient de puissance, la vitesse spécifique, l'angle de calage ainsi que la vitesse mécanique de l'éolienne sont présentés sur la figure (III-13).

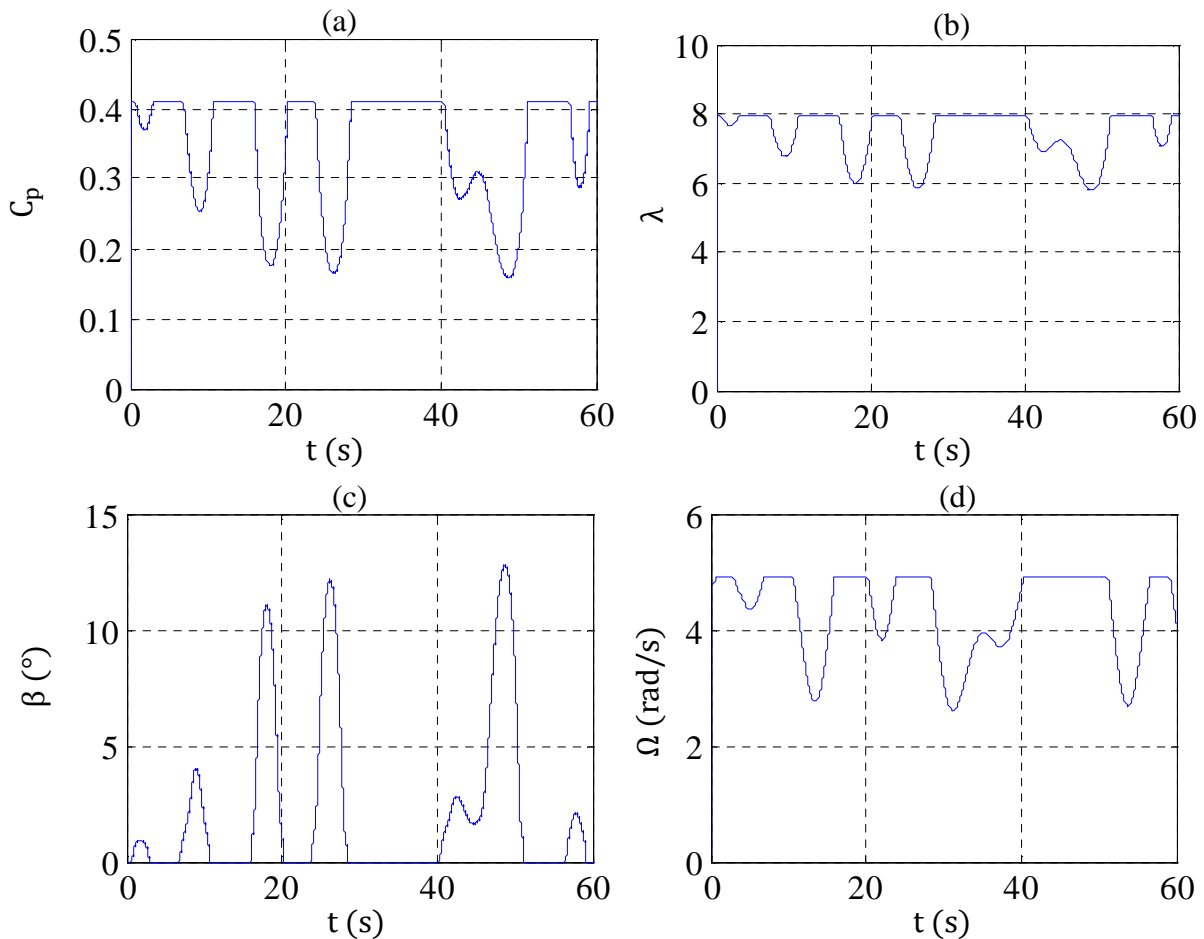


Figure III-13: (a) Coefficient de puissance, (b) vitesse spécifique, (c) angle de calage et (d) vitesse mécanique de l'éolienne

Lorsque la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse nominale, la chaîne de conversion fonctionne sous le contrôle MPPT, et quand cette vitesse dépasse sa valeur nominale l'angle

de calage augmente, dégradant ainsi le coefficient de puissance, tout en gardant la vitesse et la puissance constantes.

Du côté de la machine, la tension et le courant d'une phase statorique ainsi que les puissances active et réactive sont donnés sur la figure (III-14).

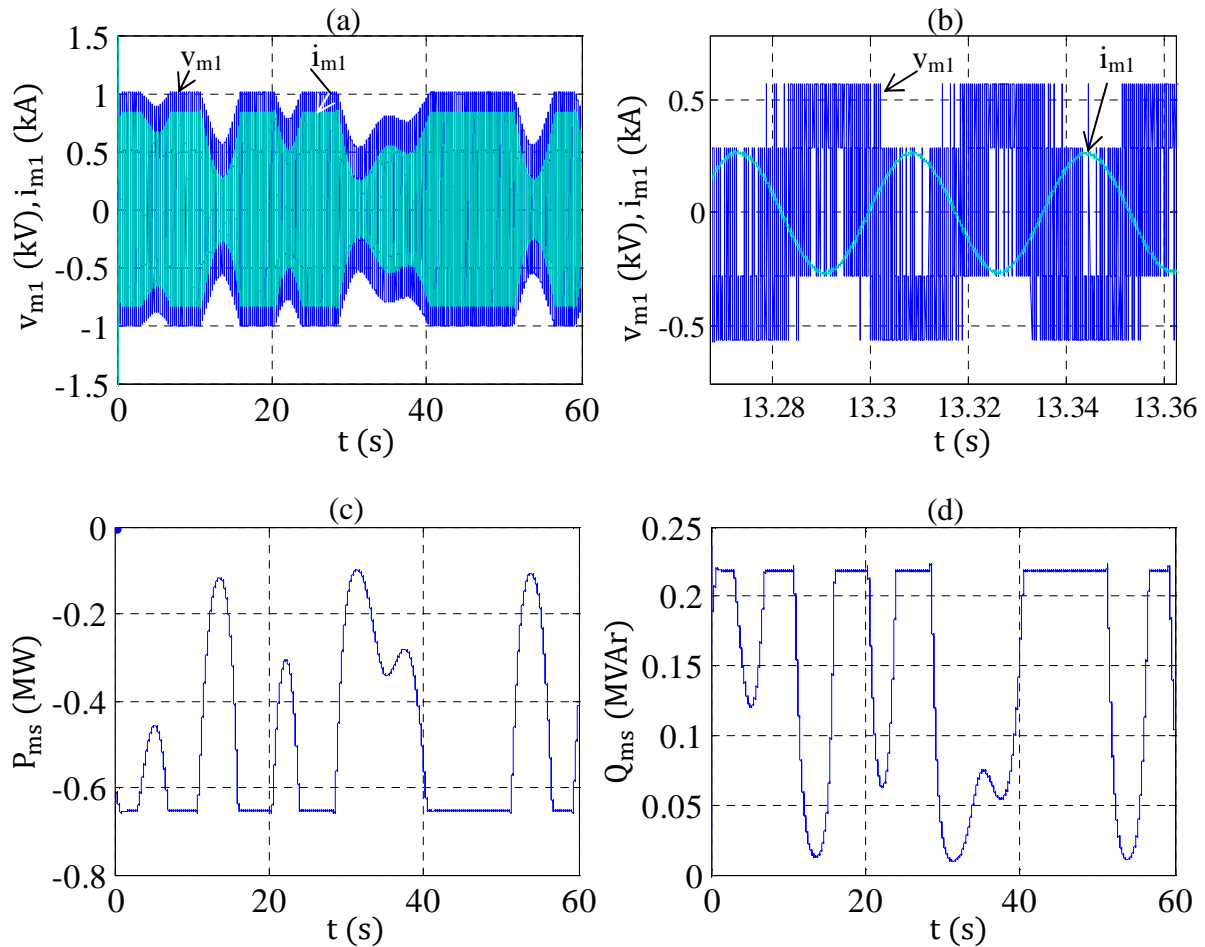


Figure III-14: Courants, tensions et puissances de la MSAP

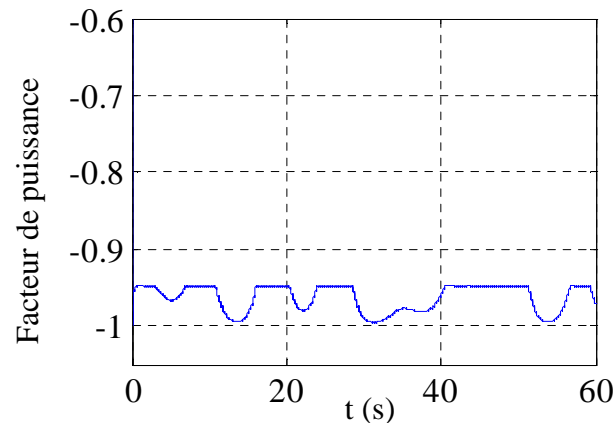


Figure III-15: Facteur de puissance côté machine

Le contrôle par des régulateurs à hystérésis a permis d'avoir des courants de forme sinusoïdale (figure III-14b). La puissance active est optimisée par la MPPT et limitée à sa valeur nominale (660 kW) lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur nominale (figure III-14c). La puissance réactive n'est pas nulle (figure III-14d), néanmoins le facteur de puissance (figure III-15) reste proche de l'unité.

Les tensions, les courants ainsi que la puissance au niveau du bus continu sont présentés sur la figure (III-16).

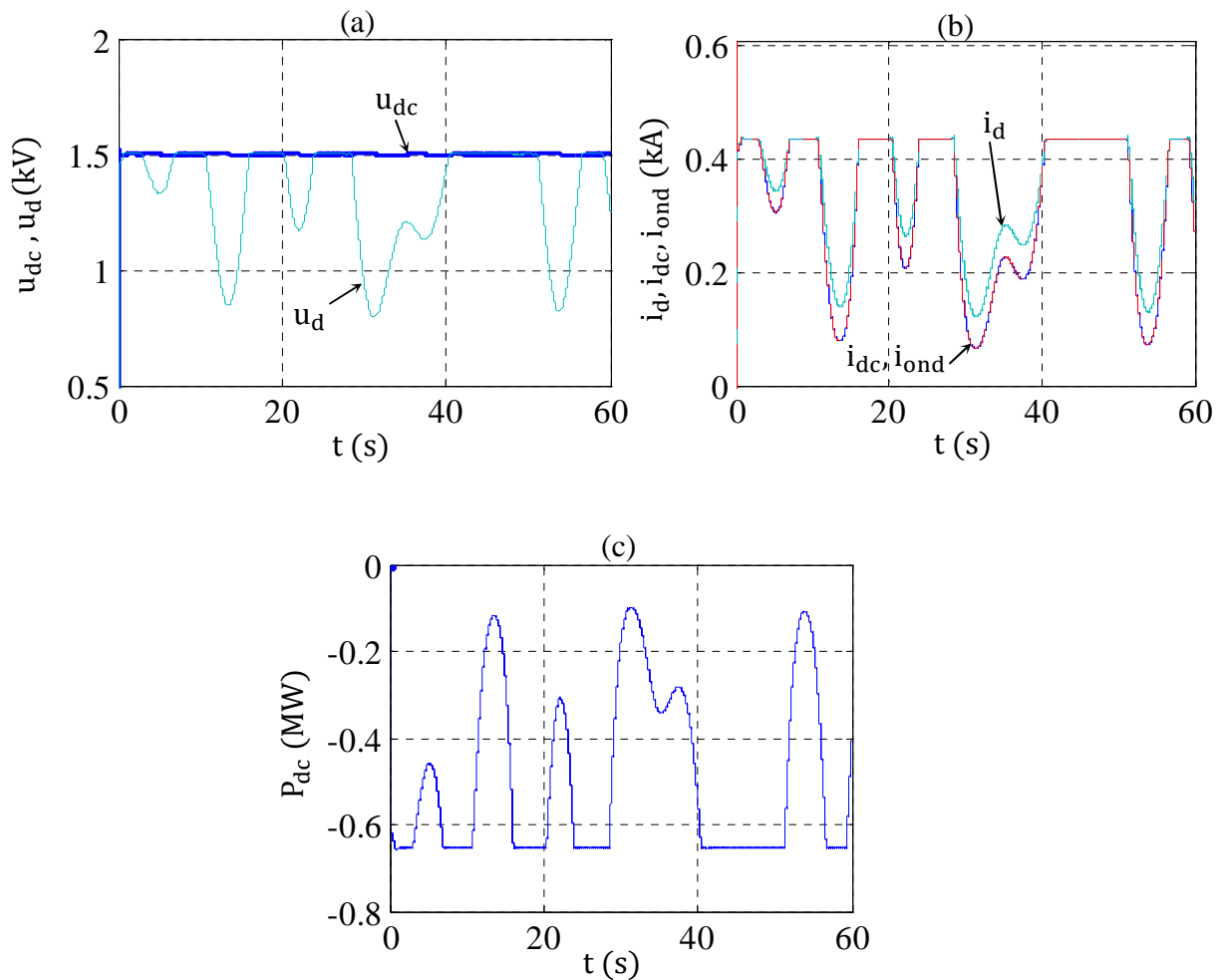


Figure III-16: Tensions, courants et puissance du bus continu

La tension d'une phase à la sortie de l'onduleur est donnée sur la figure (III-17a, b), les signaux de commande imposés à l'onduleur sont obtenus grâce à la comparaison des tensions de références avec une porteuse triangulaire caractérisée par un indice de modulation et un coefficient de réglage égaux à 21 et 0.8 respectivement.

La tension d'une phase raccordée au réseau ainsi que le courant sont présentés sur la figure (III-17c, d), leur fréquence est de 50 Hz (fréquence du réseau électrique). Le déphasage angulaire de 180° entre l'onde du courant et celle de la tension est justifié par le fonctionnement à facteur de puissance unitaire imposé par la commande (figure III-17d), à cet effet on constate bien que la puissance réactive est nulle selon sa référence imposée et la puissance active suit également sa référence (figure III-17e).

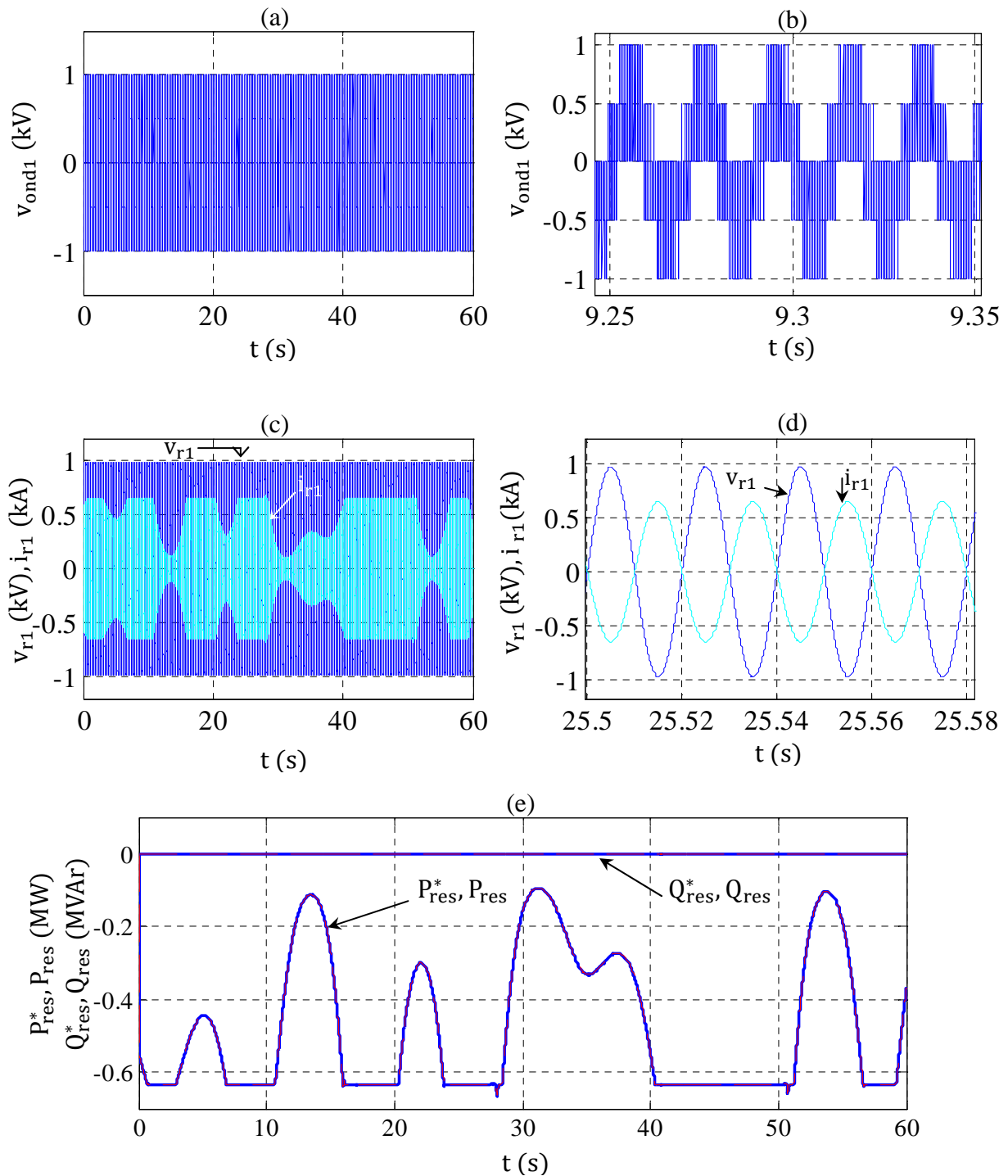


Figure III-17: Tensions, courants et puissances du côté du réseau électrique

8. Commande purement électrique de la chaîne de conversion

8.1. Principe de la commande

Dans ce cas, l'optimisation de puissance est réalisée par l'algorithme basé sur la logique floue. Il nécessite uniquement la mesure de la puissance active (au niveau de la machine ou du bus continu) et de la vitesse de rotation mécanique.

Lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur nominale, la vitesse de rotation de la génératrice peut augmenter en conséquence (sans aucune intervention sur la turbine éolienne). Par conséquent, le couple mécanique sur l'arbre est donné par l'expression suivante :

$$C_m = \frac{P_n}{\Omega} \quad \text{(III-56)}$$

Tel que P_n est la puissance nominale de la génératrice.

De cette manière la puissance sera limitée à sa valeur nominale en intervenant uniquement sur la commande de la génératrice synchrone.

Au niveau du bus continu, le hacheur survolteur sera remplacé par un hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost). Il opère en mode survolteur pour un fonctionnement au dessous des vitesses nominales de la génératrice et en mode dévolteur en dessus du régime nominale, dans le but de maintenir la tension constante en sortie (figure III-18).

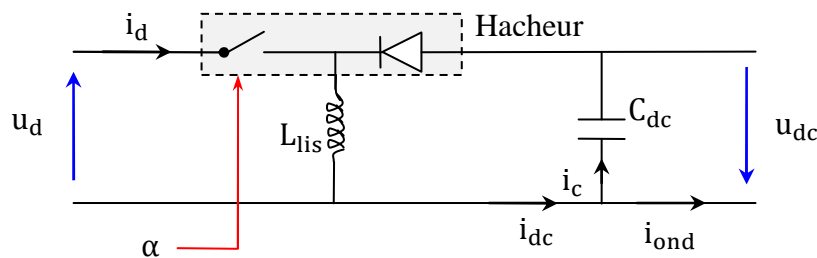


Figure III-18: Bus continu avec un hacheur survolteur-dévolteur

Le schéma de régulation de la tension u_{dc} ne diffère pas du cas précédent (figure III-9), cependant, les relations entre les courants et les tensions d'entrée et de sortie du hacheur sont définies comme suit :

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{\alpha}{1-\alpha} u_d \\ i_{dc} = \frac{1-\alpha}{\alpha} i_d \end{cases} \quad \text{(III-57)}$$

La commande du convertisseur du côté du réseau électrique est semblable au cas précédent et les résultats de simulation sont également les mêmes.

8.2. Résultats de simulation et interprétations

Nous avons opté pour le profil de vent donné sur la figure (III-19). Les résultats de simulation obtenus sous Matlab sont donnés sur les figures (III-20)-(III-23).

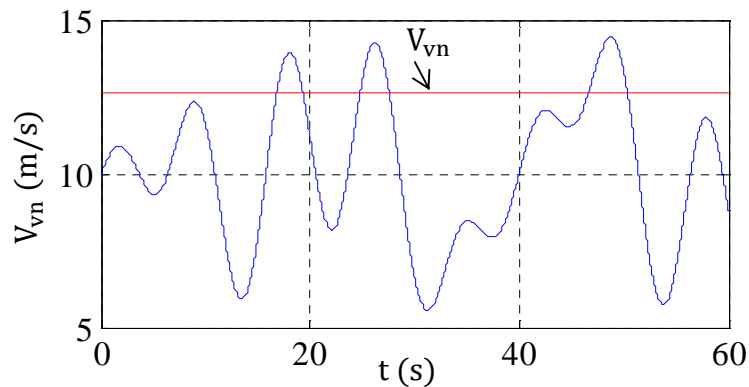


Figure III-19: Allure de la vitesse du vent

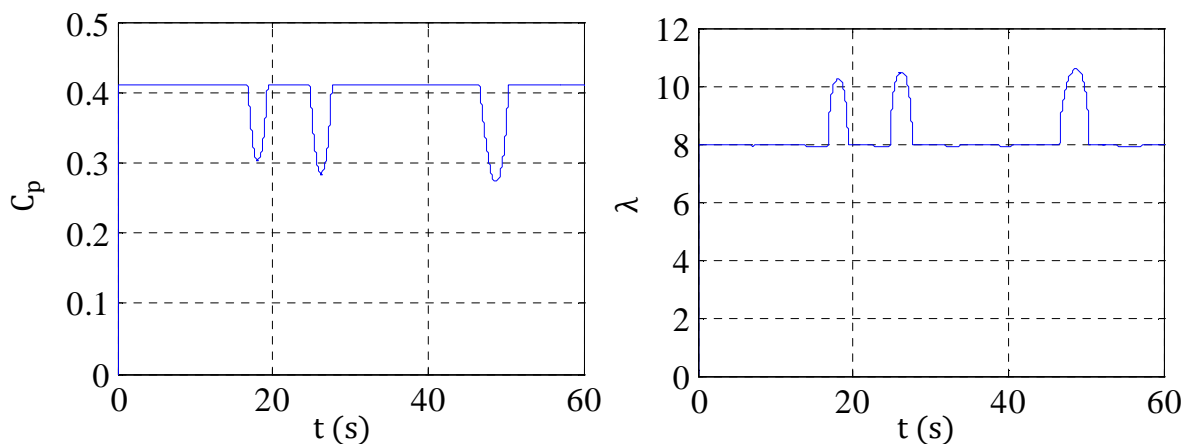


Figure III-20: Coefficient de puissance et vitesse spécifique

Le profil de la vitesse du vent considéré présente trois zones de fonctionnement au dessus de la vitesse nominale. Sur ces trois zones, on constate sur la figure (III-20) que le coefficient de puissance diminue alors que la vitesse spécifique augmente ce qui correspond à une limitation de puissance à droite du point optimal sur la caractéristique $\lambda - C_p$. Pour des vitesses du vent inférieures, l'algorithme de la logique floue génère une référence de vitesse Ω_{LF} (figure III-21a), pour la commande de la MSAP, qui permet de maintenir le coefficient de puissance à sa valeur maximale.

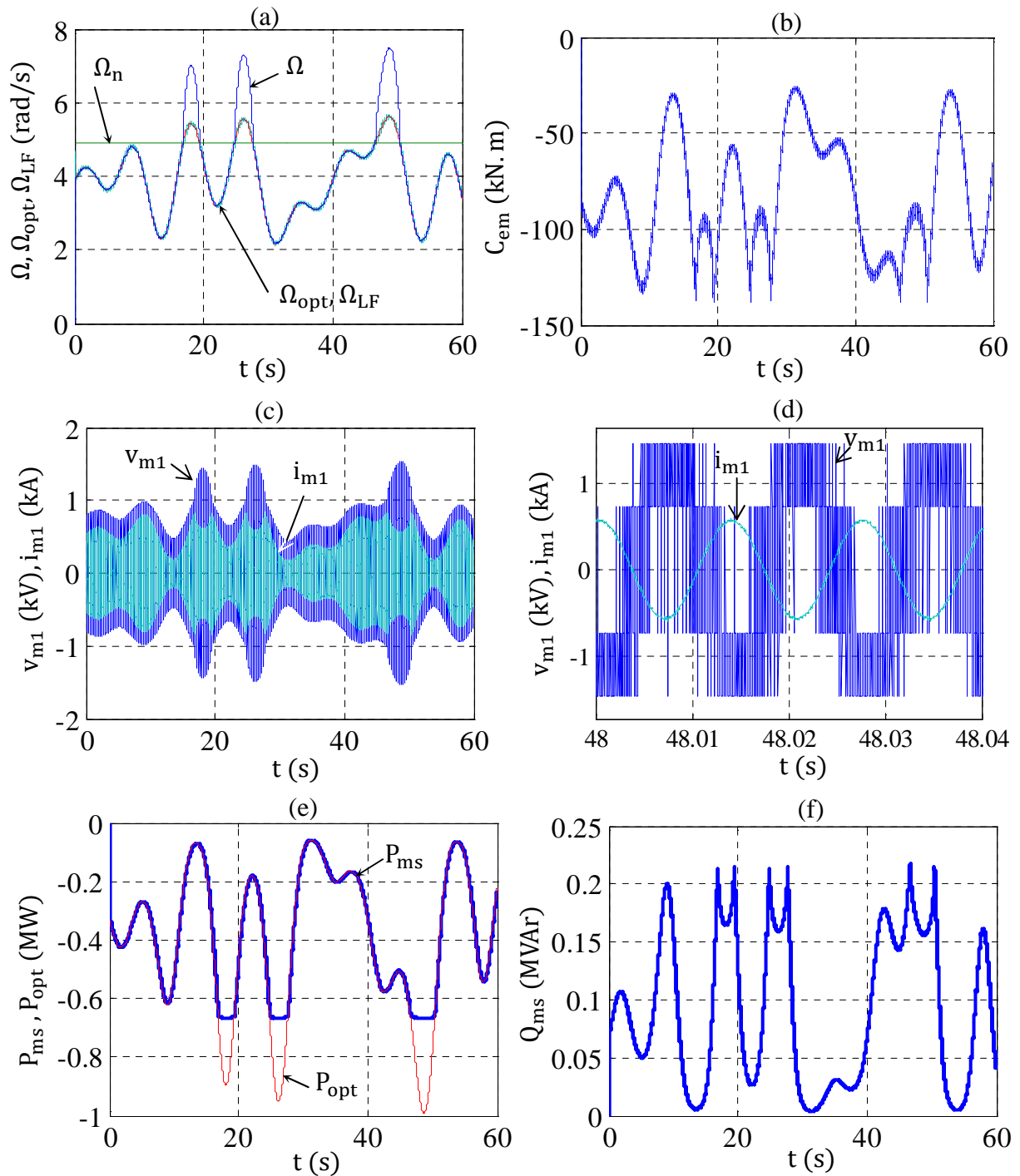


Figure III-21: Vitesse de rotation, couple électromagnétique, tension, courant et puissances de la MSAP

L'augmentation de la vitesse de rotation dans les zones où la puissance est limitée (figure III-21a, e) occasionne une diminution du couple électromagnétique et une augmentation de la tension de la MSAP (accompagnée d'une diminution du courant) comme on peut le constater sur la figure (III-21b, c, d). La puissance réactive (figure III-21f), diminue également dans ces zones, ce qui contribue à améliorer le facteur de puissance (figure III-22).

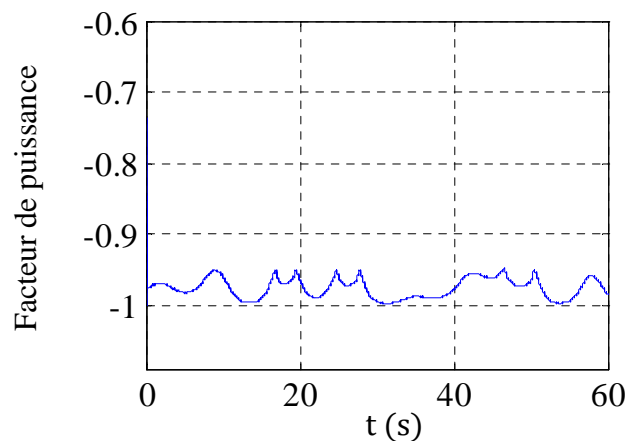


Figure III-22: Facteur de puissances de la MSAP

Les tensions, les courants ainsi que la puissance du bus continu sont présentés sur la figure (III-23). Au delà du régime nominale, la tension en amont du hacheur est supérieure à 1.5 kV , par conséquent, le hacheur opère en mode dévolteur afin de maintenir le niveau de tension nécessaire pour l'onduleur de raccordement au réseau électrique.

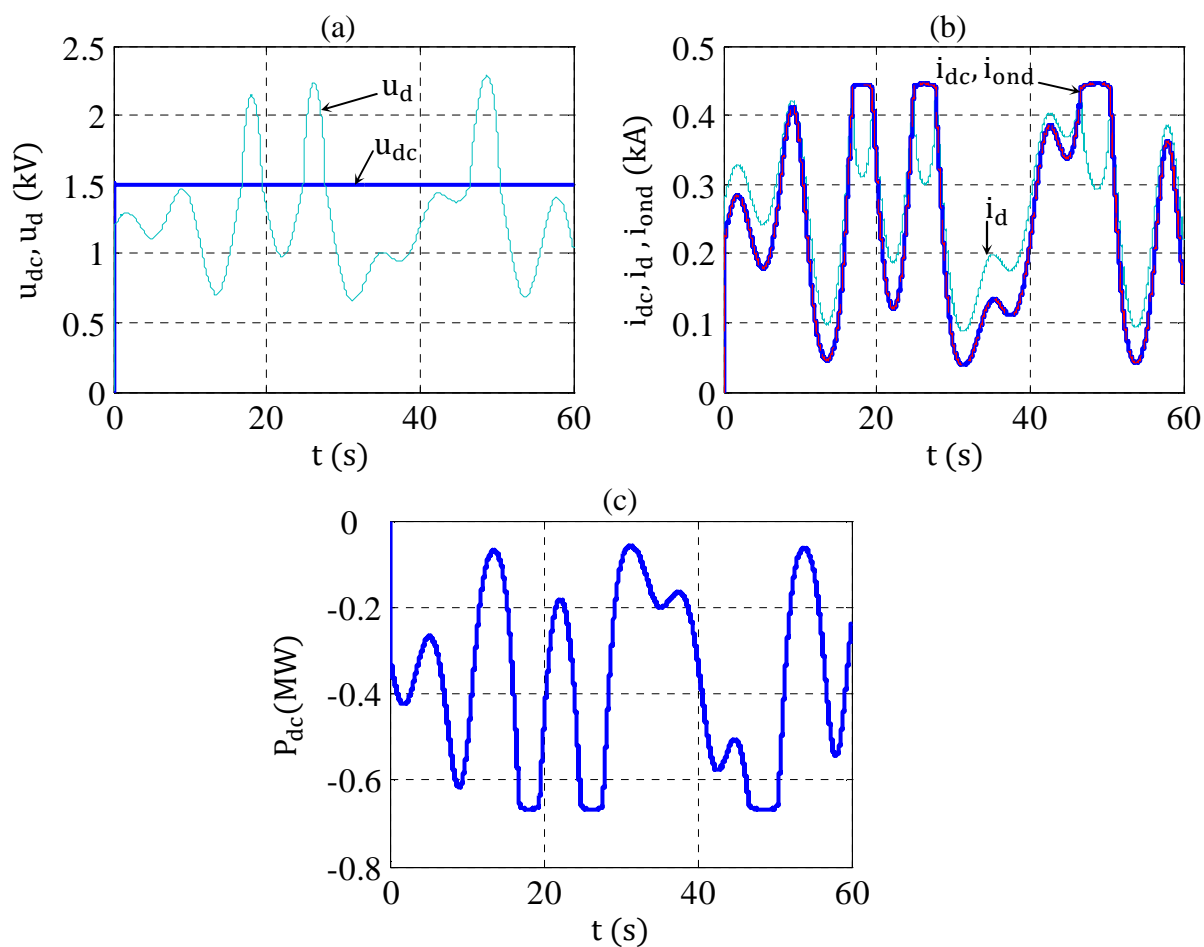


Figure III-23: Tensions, courants et puissance du bus continu

Conclusion

Dans ce chapitre une étude et une simulation numérique ont été menées sur un aérogénérateur basé sur une MSAP (à attaque direct) et raccordé au réseau électrique.

Dans un premier lieu, l'optimisation de puissance a été effectuée par la méthode conventionnelle, basée sur la mesure de la vitesse du vent et la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne. La limitation de puissance est achevée par un contrôle au niveau de la turbine éolienne de type Pitch. L'angle de référence, dans ce cas, est calculé par l'algorithme de la logique floue à partir de la mesure de la puissance active.

Dans un second lieu, nous avons considéré un contrôle purement électrique du système de conversion ; on agit uniquement sur la commande de la génératrice pour l'optimisation ainsi que pour la limitation de la puissance. La vitesse de référence est calculée également par la méthode de la logique floue à partir de la mesure de la puissance active et de la vitesse de rotation mécanique. Ainsi l'optimisation de puissance est obtenue sans avoir besoin d'informations sur la turbine éolienne et sans mesure de la vitesse du vent. Au delà du régime nominal, on impose à la génératrice un couple de référence égal au rapport entre la puissance nominale et la vitesse de rotation. Cette commande nécessite un léger surdimensionnement du générateur électrique et des convertisseurs statiques (redresseur et hacheur), mais le mécanisme d'orientation des pales peut être supprimé.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude et à la simulation numérique d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne en fonctionnement autonome sur une batterie de stockage et une charge électrique.

CHAPITRE IV :

**ETUDE DE CAS, AEROGENERATEUR EN FONCTIONNEMENT
AUTONOME****Introduction**

Cette partie est consacrée à l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite puissance en fonctionnement autonome (sans connexion au réseau électrique). Dans ce cas, on peut rencontrer plusieurs configurations qui peuvent être composées, en plus d'une turbine et d'une MSAP, d'un redresseur commandé ou non commandé (à diodes), d'un hacheur, d'une batterie de stockage et d'une charge. Notre choix est porté sur la configuration réalisant un meilleur compromis entre efficacité énergétique, complexité du système et du coût globale.

1. Chaîne de conversion avec redresseur à diodes et une batterie

Cette structure (figure IV-1) est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du redresseur à diodes. Le coût d'un tel système est clairement minimal par rapport aux autres configurations existantes et l'absence des composants commandés diminue le nombre de capteurs nécessaires.

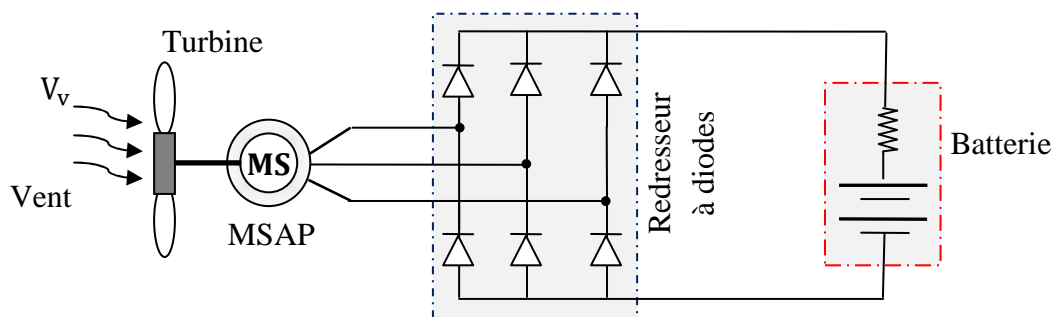


Figure IV-1 : Chaîne de conversion utilisant un redresseur à diodes

L'optimisation de puissance dans ce cas n'est plus possible et par conséquent, une conception adéquate du système s'impose avec un calcul précis de tous les paramètres des éléments de la chaîne afin de faire fonctionner naturellement la turbine autour du point optimal de puissance pour des vitesses de vent proches de la vitesse nominale [Mir05].

2. Chaîne de conversion avec redresseur commandé

L'utilisation d'un redresseur commandé (figure IV-2) permet un pilotage vectoriel de la génératrice. Le contrôle des grandeurs électromagnétiques tel que le couple ou la vitesse de rotation de la machine devient possible. L'optimisation ou la limitation de puissance captée par la turbine éolienne peuvent être mis en œuvre à l'aide d'un pilotage en MPPT du redresseur MLI.

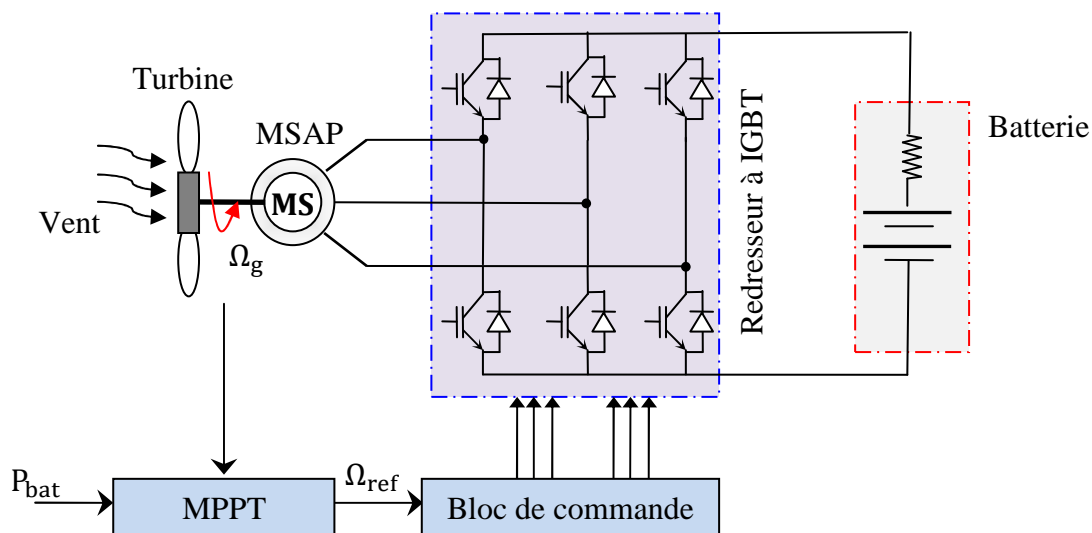


Figure IV-2 : Chaîne de conversion utilisant un redresseur commandé

Les inconvénients de cette structure, relatifs à la gamme de faibles puissances, reposent sur la complexité du montage qui comporte des composants commandés nécessitant en générale un capteur mécanique de position. De plus, cette structure survolteuse présente, pour l'application chargeur de batterie, l'inconvénient de nécessiter un bus de tension continu suffisant pour les plus fortes vitesses de vent. Dans ces conditions un étage dévolteur est indispensable en aval du redresseur pour raccorder la batterie en toute sécurité [Mir05].

3. Chaîne de conversion avec redresseur à diodes et un hacheur

La simplification de la chaîne de conversion, permettant de réduire le coût du système, ne doit pas diminuer son efficacité énergétique. Les configurations basées sur un redresseur commandé sont onéreuses, comportent des dispositifs de mesure mécanique et demandent un circuit de commande assez complexe.

Dans la suite de cette partie, une structure utilisant un redresseur à diodes suivi d'un hacheur sera développée (figure IV-3). En agissant sur la commande du hacheur on peut accomplir la recherche du point de puissance maximale pour chaque vitesse du vent (optimisation indirecte) par la régulation du courant de charge. On contrôle ainsi le courant de charge qui débite dans une batterie selon le point de fonctionnement de la turbine éolienne.

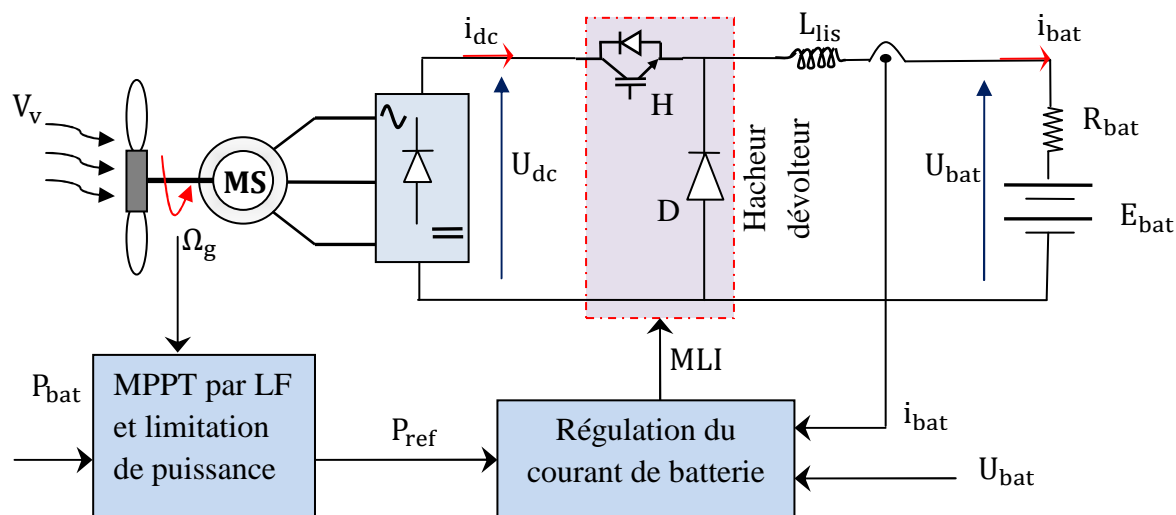


Figure IV-3 : Chaîne de conversion avec un redresseur à diode et un hacheur

3.1. Optimisation de puissance du côté DC

On considère une batterie d'une tension fixe (sa résistance interne est négligée), la régulation du courant dans la batterie est équivalente à la régulation de la puissance batterie. Cette puissance est donnée par l'expression :

$$P_{bat} = U_{bat} i_{bat} \quad (IV-1)$$

En prenant en compte le rendement global dans le bilan des puissances, on aura :

$$P_{bat} = \eta P_t = \eta C_t \Omega \quad (IV-2)$$

Sous la condition du fonctionnement optimal de la turbine éolienne, on a :

$$P_{opt} = k_{opt} \Omega_{opt}^3 \quad (IV-3)$$

Alors la puissance maximale injectée dans la batterie peut être exprimée par la relation :

$$P_{bat_max} = \eta k_{opt} \Omega_{opt}^3 \quad (IV-4)$$

A l'aide des équations (IV-1), (IV-4), on calcul le courant optimal de batterie (courant de référence) :

$$I_{\text{bat_ref}} = \eta \frac{k_{\text{opt}}}{U_{\text{bat}}} \Omega_{\text{opt}}^3 \quad (\text{IV-5})$$

On constate alors que l'optimisation de puissance peut être réalisée en utilisant seulement un capteur de vitesse pour la mesure de la vitesse de rotation de la machine.

Si on considère que les forces électromotrices de la machine sont proportionnelles à la vitesse de rotation, la tension continue à la sortie du redresseur à diodes sera aussi proportionnelle à la vitesse de rotation. Dans ce cas, le capteur mécanique servant à la mesure de la vitesse de rotation de la génératrice peut être remplacé par une simple mesure de la tension du bus continu. En effet :

$$E_{\text{ab_max}} = \sqrt{6} \Phi_{\text{eff}} p \Omega \quad (\text{IV-6})$$

Donc :

$$U_{\text{dc}} = \frac{3}{\pi} E_{\text{ab_max}} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} \Phi_{\text{eff}} p \Omega \quad (\text{IV-7})$$

Avec :

$E_{\text{ab_max}}$: Force électromotrice composée maximale de la génératrice ;

Φ_{eff} : Flux efficace produit par les aimants permanents ;

p : Nombre de paires de pôles de la génératrice.

En reprenant l'équation (IV-7), la vitesse de rotation peut s'écrire comme suite :

$$\Omega = k_{\text{dc}} U_{\text{dc}} \quad (\text{IV-8})$$

Avec :

$$k_{\text{dc}} = \frac{\pi}{3\sqrt{6} p \Phi_{\text{eff}}} \quad (\text{IV-9})$$

A l'aide de l'équation (IV-4), la puissance batterie est donnée en fonction de la tension U_{dc} par l'équation :

$$P_{\text{bat_max}} = \eta k_{\text{opt}} (k_{\text{dc}} U_{\text{dc}})^3 = k'_{\text{opt}} U_{\text{dc}}^3 \quad (\text{IV-10})$$

Dans ce cas le dispositif MPPT peut se mettre sous la forme donnée par la figure (IV-4). Le courant de référence peut être déterminé à l'aide de l'équation (IV-1).

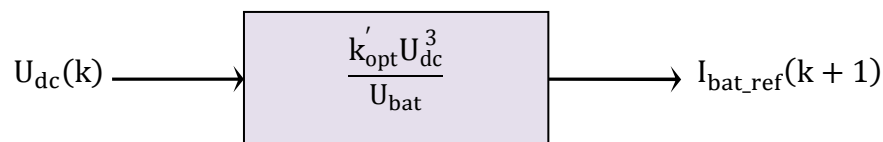


Figure IV-4 : Structure du dispositif MPPT en utilisant la tension du bus continu

Dans l'algorithme d'optimisation de puissance par logique floue détaillée au chapitre II, la vitesse de rotation peut être remplacée par la tension continue U_{dc} afin d'optimiser la puissance injectée dans la batterie.

3.2. Limitation de puissance pour les vents forts

Pour limiter la puissance dans le système éolien, deux modes de fonctionnement peuvent être envisagés. Selon le mode choisi, les contraintes mécaniques ou électriques sur la turbine éolienne, la génératrice, les convertisseurs statiques et la batterie peuvent être repoussées.

En se situant soit à gauche ou à droite du point optimal (PO) sur la courbe $C_p(\lambda)$ (figure IV-5a), la puissance éolienne peut être limitée par rapport à la puissance maximale. Dans ce cas, le dispositif MPPT doit être impérativement dégradé.

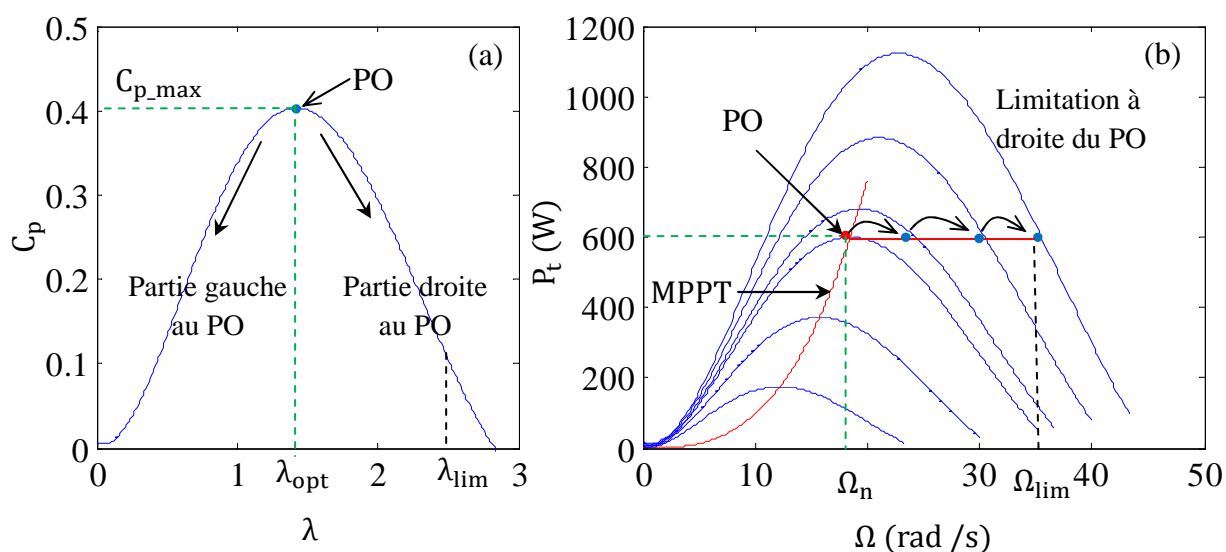


Figure IV-5 : Modes de limitation de puissance de la chaîne éolienne

Dans le cas d'un déplacement du point de fonctionnement vers le côté gauche de l'optimum, la vitesse de rotation de la turbine est diminuée. Par contre, en le déplaçant vers la droite de l'optimum, la vitesse de rotation augmente. Cependant, dans les deux cas, la puissance éolienne en mode limitée sera égale à la puissance nominale.

Le déplacement du point de fonctionnement vers le côté gauche sur la caractéristique $C_p(\lambda)$ exige un léger surdimensionnement de la vitesse de rotation et de la tension supportée par la génératrice. La tension maximale supportée par les composants d'électronique de puissance doit être aussi prévue.

La façon de procéder est simple, il suffit d'imposer la puissance de référence au niveau correspondant à la puissance limite (nominale), ce qui revient à limiter la charge mécanique opposée par la génératrice. La vitesse augmente alors jusqu'à la valeur Ω_{lim} qui correspond à la vitesse réduite limite λ_{lim} (figure IV-5). Dans le cas de la structure associant redresseur à diodes et un hacheur (figure IV-3), cette limitation peut être réalisée par une simple comparaison de la puissance côté batterie avec une valeur limite correspondant à la puissance nominale de la chaîne de conversion, 600 W dans notre cas (figure IV-6).

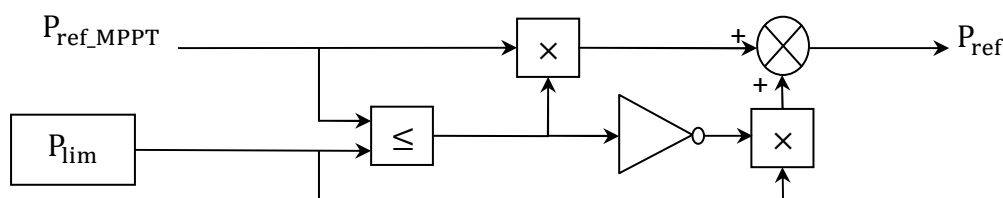


Figure IV-6 : Limitation de puissance en cas de forts vents

4. Etude et commande du hacheur

Le redresseur à diodes est un élément passif non commandé, par conséquent, le hacheur devient l'élément clé de la chaîne de conversion. Plusieurs types de hacheur peuvent être utilisés : dévolteur, survolteur-dévolteur ainsi que le hacheur en pont (asymétrique) [Yin08, Bro99, And08, Taf08, Taf01]. Dans le cadre de notre étude seulement le hacheur dévolteur sera considéré.

4.1. Fonctionnement du hacheur dévolteur

Le schéma de base de ce hacheur est donné sur la figure (IV-7), il débite sur une batterie à travers une inductance de lissage. Avec un hacheur dévolteur on contrôle le courant dans la batterie, l'ondulation permise de ce courant permet de dimensionner l'inductance de lissage.

En conduction continue, le montage présente deux phases de fonctionnement :

Phase 1 : H conduit, D bloquée : $U_D = U_{dc}$, $i_{bat} = i_H$, $i_D = 0$

Phase 2 : D conduit, H bloquée : $U_D = 0$, $i_H = 0$, $i_D = i_{bat}$

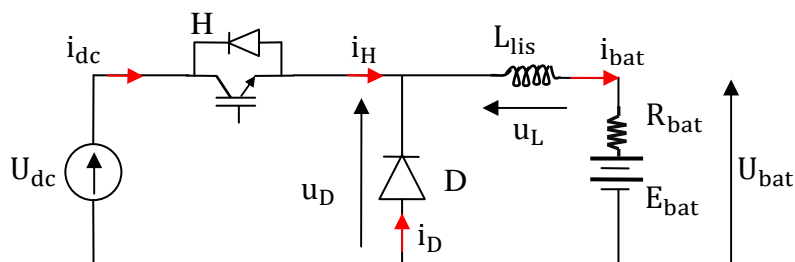


Figure IV-7 : Montage d'un hacheur dévolteur débitant sur une batterie

Les équations relatives au montage de la figure (IV-7) sont :

$$u_D = u_L + u_{bat} \quad (IV-11)$$

$$u_D = E_{bat} + R_{bat}i_{bat} + L_{lis} \frac{d}{dt}i_{bat} \quad (IV-12)$$

$$u_L = L_{lis} \frac{d}{dt}i_{bat} \quad (IV-13)$$

Sur une période de commutation T_c du hacheur, on a (en valeur moyenne) (figure IV-8a):

$$U_D = \alpha U_{dc} \quad (IV-14)$$

Tel que α est l'angle d'amorçage de l'IGBT.

Si on néglige la résistance R_{bat} , le courant i_{bat} aura une évolution linéaire croissante de 0 à αT_c et décroissante de αT_c à T .

L'ondulation du courant dans ce cas s'exprime en fonction de α comme suit :

$$\Delta i_{bat} = I_{bat_max} - I_{bat_min} = \frac{U_{dc}T_c}{L_{lis}}\alpha(1 - \alpha) \quad (IV-15)$$

Il s'agit de l'équation d'une parabole (figure IV-8b), présentant un maximum pour $\alpha = 0.5$; dans ce cas :

$$\Delta i_{bat_max} = \frac{U_{dc}T_c}{4L_{lis}} \quad (IV-16)$$

Si α est maintenu constant, l'ondulation du courant s'exprime en fonction de la fréquence de commutation f_c comme suit :

$$\Delta i_{bat} = \frac{U_{dc}}{L_{lis}}\alpha(1 - \alpha)\frac{1}{f_c} \quad (IV-17)$$

On constate que l'ondulation du courant a une allure hyperbolique en fonction de f_c (figure IV-8c)

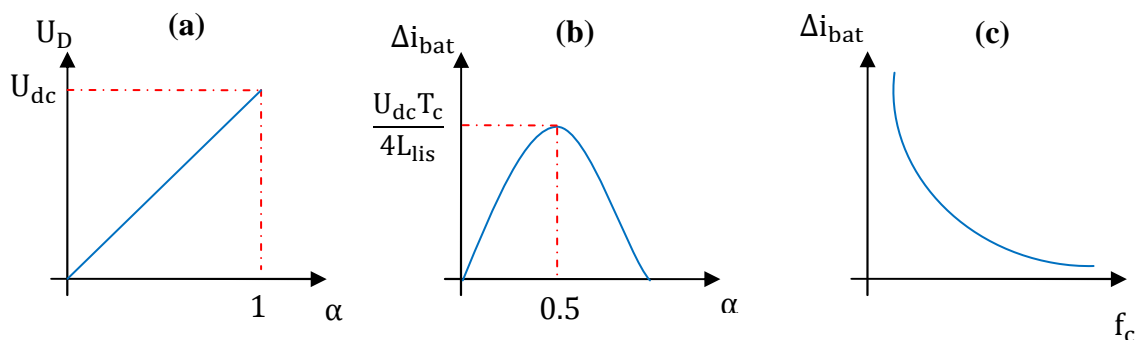


Figure IV-8 : Courbes caractéristiques du fonctionnement du hacheur

4.2. Commande du hacheur

En se basant sur les équations (IV-11) à (IV-14), on peut construire le schéma de régulation du courant dans la batterie (figure IV-9).

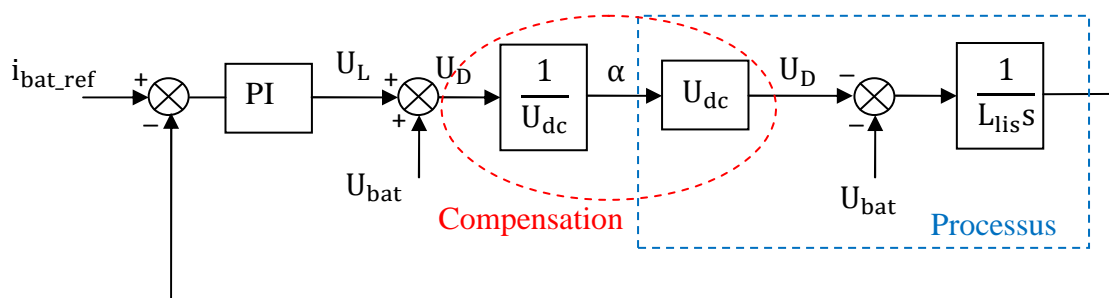


Figure IV-9 : Schéma complet de la boucle de régulation du courant dans la batterie

Des simplifications peuvent être introduites sur la boucle de régulation en négligeant les termes de perturbations et de compensation (figure IV-10) afin de déterminer les paramètres du régulateur PI (ses paramètres sont donnés en annexe A).

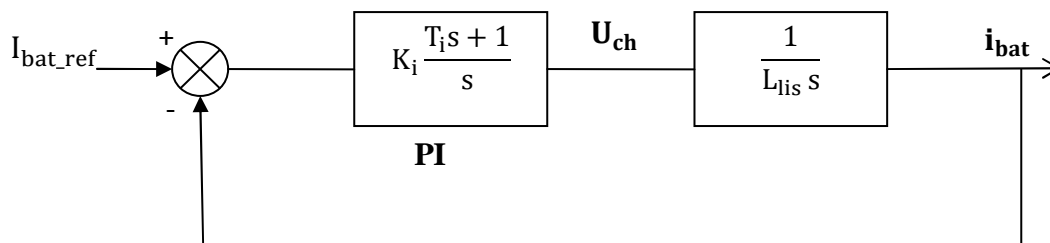


Figure IV-10 : Schéma simplifié de la régulation du courant dans batterie

Le courant de référence est obtenu à partir de la puissance de référence générée par la stratégie MPPT.

L'interrupteur IGBT est commandé par un signal à MLI. La valeur du rapport cyclique α est donc comparée à une porteuse triangulaire de fréquence élevée.

4.3. Plage de fonctionnement

Dans le cas de fortes valeurs de la vitesse du vent, la tension aux bornes de la génératrice devienne élevée à cause de l'augmentation de la vitesse de rotation (équation IV-6).

Le fonctionnement du hacheur dévolteur simple impose des limitations vis-à-vis de la plage d'application du système éolien. La tension à l'entrée du hacheur U_{dc} possède des butées minimale et maximale qui sont déterminées par la tension de la batterie de stockage et par les butées du rapport cyclique α_{min} et α_{max} .

En supposant les pertes négligeables, la tension redressée minimale à l'entrée du hacheur est :

$$U_{dc_min} = \frac{U_{bat}}{\alpha_{max}} \quad (IV-18)$$

La tension maximale est donnée aussi par la relation :

$$U_{dc_max} = \frac{U_{bat}}{\alpha_{min}} \quad (IV-19)$$

La tension redressée dépend de la tension alternative à l'entrée du pont de diodes comme l'indique l'équation (IV-7).

Pour un fonctionnement optimal, la vitesse de rotation est donnée par l'expression :

$$\Omega = \frac{\lambda_{opt}}{R} V_v \quad (IV-20)$$

Dans ce cas, la tension redressée sera exprimée comme suit :

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{6} \lambda_{opt}}{\pi R} P \Phi_{eff} V_v \quad (IV-21)$$

Alors, la vitesse du vent s'exprime, en fonction de la tension batterie, par la relation suivante :

$$V_v = \frac{\pi R}{3\sqrt{6} P \Phi_{eff} \lambda_{opt} \alpha} U_{bat} \quad (IV-22)$$

A l'aide des équations (IV-18), (IV-19) et (IV-22), la plage de fonctionnement de la chaîne éolienne tolérée par le hacheur sera exprimée par l'inégalité suivante :

$$V_{v_min} \leq V_v \leq V_{v_max}$$

Les limites V_{v_min} et V_{v_max} sont calculées par l'expression (IV-22) en remplaçant α par α_{max} et α_{min} respectivement pour une tension batterie donnée. Nos calculs ont donné les résultats du tableau (IV-1) pour une tension batterie de 12 V et de 24 V.

Tableau IV-1: Plage de fonctionnement du système éolien selon la tension batterie

| | 12 V | 24 V |
|--------------------|------|------|
| V_{v_min} (m/s) | 1.3 | 2.6 |
| V_{v_max} (m/s) | 24.6 | 49.2 |

Finalement, on peut constater que le choix du hacheur dévolteur est justifié et qu'une batterie de tension nominale de 12 V suffit pour cette chaîne de conversion de 600 W.

5. Batterie

Une approche très simplifiée du circuit équivalent de la batterie consiste à supposer qu'elle est constituée d'une source de tension parfaite E_{bat} en série avec une résistance interne R_{bat} (figure IV-11).

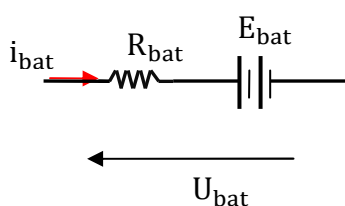


Figure IV-11 : Schéma simplifié d'une batterie

Si on s'intéresse au comportement de la batterie, son étude et modélisation dépendra du type de batterie utilisée et de nombreux paramètres qui caractérisent son fonctionnement. Ces paramètres sont en générale [Den06, Dil04]:

- Etat initial de charge : E_{b0} (%) ;
- Etat de charge maximal : $E_{b_{max}}$ (Wh), capacité maximale de la batterie ;

- Nombre de plaques en série : N_s ;
- Coefficient d'efficacité charge/décharge : k (sans unité) ;
- Coefficient d'autodécharge : D (h^{-1}).

On peut noter que les paramètres D et k sont des constantes empiriques et elles dépendent des caractéristiques de la batterie. L'état de charge (en %) est relié à la tension batterie à circuit ouvert par une relation linéaire. La tension de charge initiale peut être estimée en se basant sur la tension aux bornes de la batterie à circuit ouvert [Den06].

Cependant, ces paramètres n'ont pas été pris en compte dans nos simulations, seulement le modèle de batterie fournie avec le logiciel Psim a été utilisé.

En se référant à la figure (IV-11), la tension batterie est donnée par :

$$U_{bat} = E_{bat} + R_{bat}I_{bat} \quad (IV-23)$$

Le courant I_{bat} est positif si la batterie est en mode de charge et négatif si la batterie est en mode de décharge (figure IV-12).

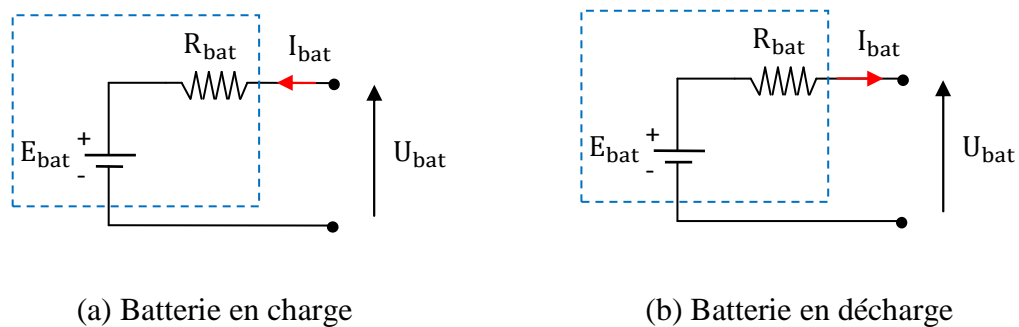


Figure IV-12 : Charge et décharge de la batterie

6. Simulation de la chaîne de conversion

Dans un premier temps nous considérons le système de conversion donné sur la figure (IV-3), les résultats de simulation avec Matlab\ Psim (Co-simulation) sont donnés sur les figures (IV-13 à 16). Les limites de fonctionnement ne sont pas atteintes.

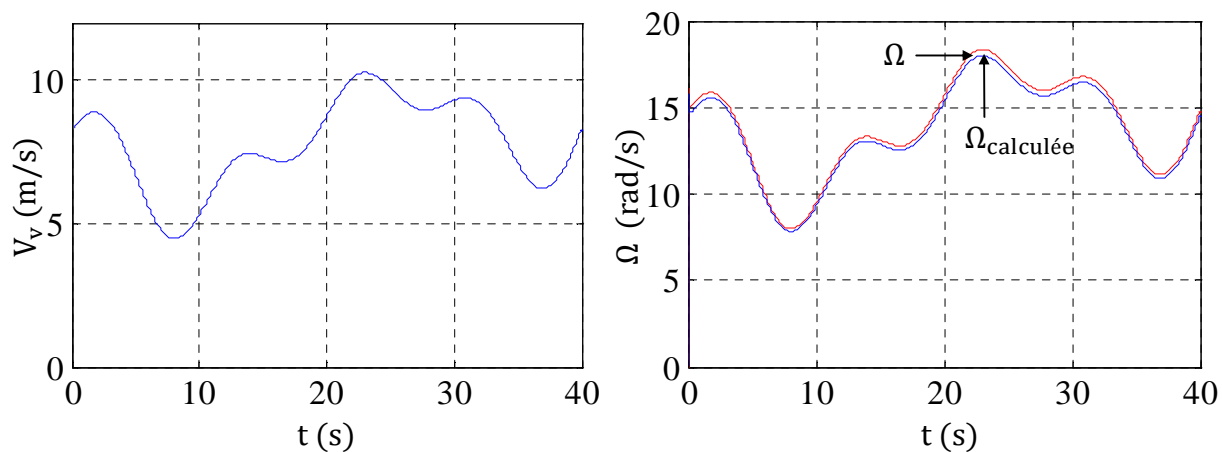


Figure IV-13 : Profil du vent et vitesses de rotation (réelle et calculée par LF)

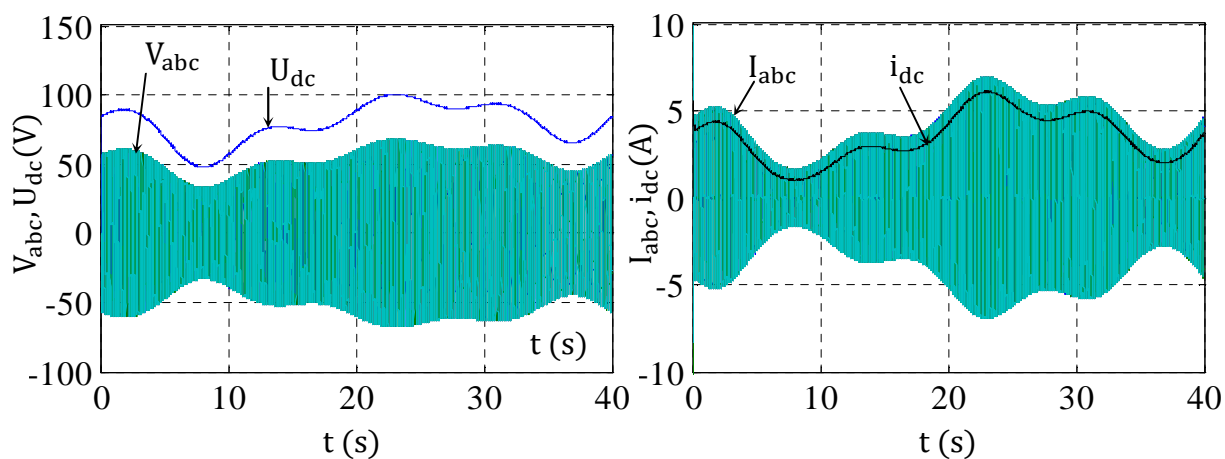


Figure IV-14 : Tensions et courants en amont et en aval du redresseur à diodes

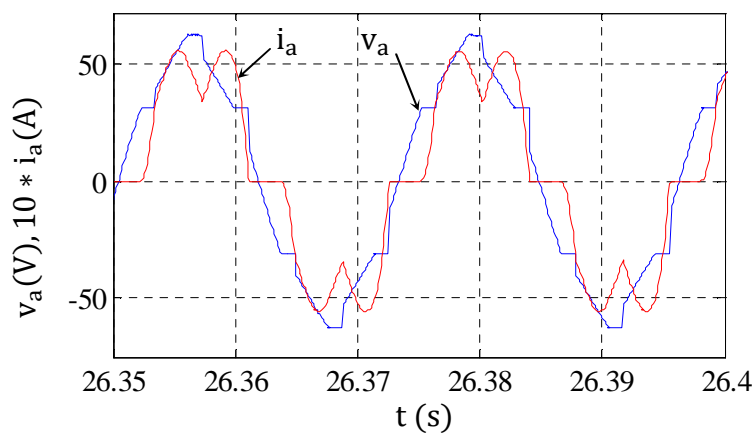


Figure IV-15 : Tension et courant d'une phase de la machine

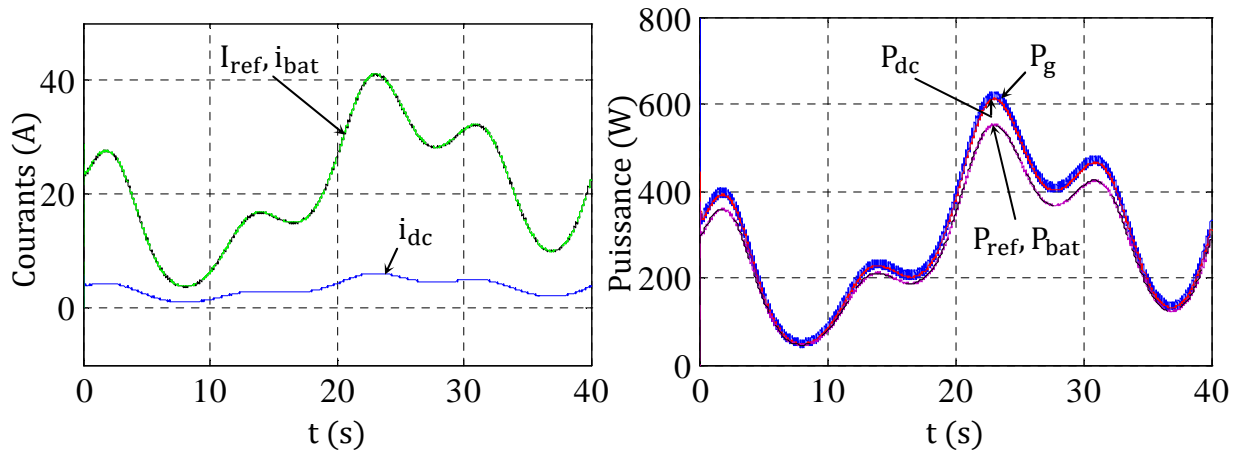


Figure IV-16 : Courants et puissance du côté DC

La vitesse calculée coïncide parfaitement avec la vitesse de rotation de la génératrice et varie selon le vent imposé (figure IV-13). La figure (IV-14) représente les tensions et les courants en amont et en aval du redresseur à diode. L'influence de l'effet d'empiètement, dû à l'inductance de la génératrice, sur les formes d'ondes des courants et des tensions en amont du redresseur à diodes est visible sur la figure (IV-15), en effet ces formes ne sont pas sinusoïdales.

Le courant dans la batterie est positif sur toute la plage de variation du vent (batterie en charge) et suit sa référence, ce qui a permis d'optimiser la puissance au niveau de la batterie. On constate également que la puissance de la génératrice P_g et la puissance en amont du hacheur P_{dc} sont légèrement supérieures à la puissance de la batterie à cause des pertes statiques du hacheur, qui apparaissent d'autant plus que le courant est élevé (figure IV-16).

Enfin, la figure (IV-17) montre les variations de la tension de la batterie ainsi que la puissance optimisée (puissance de la batterie) en fonction de la vitesse du vent.

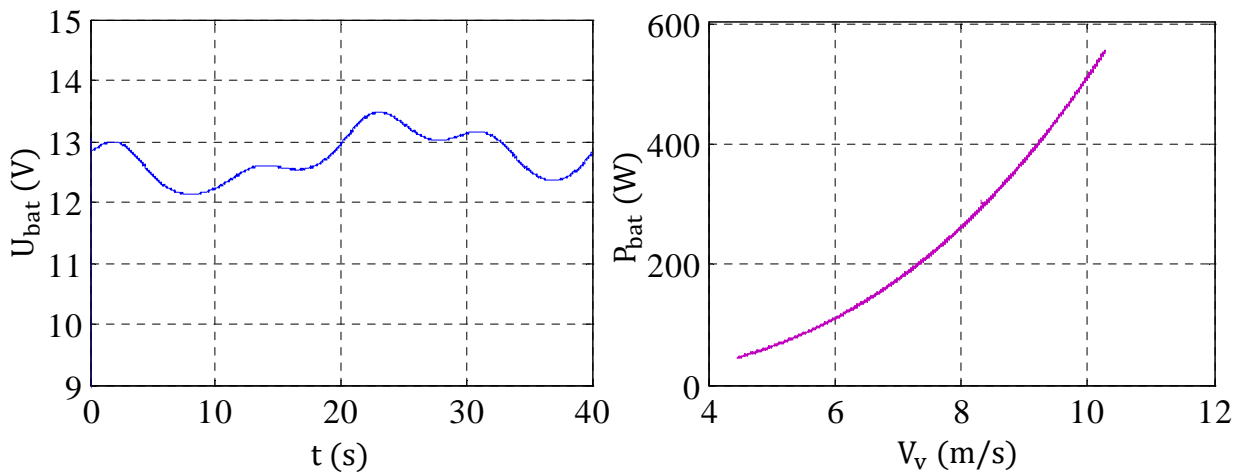


Figure IV-17 : Tension et puissance de la batterie

7. Connexion d'une charge aux bornes de la batterie

7.1. Gestion de la charge de la batterie

La surveillance de l'état de charge de la batterie à chaque instant est nécessaire afin qu'elle ne soit pas surchargée ou sous chargée, ce qui a pour effet de diminuer sa durée de vie. Pour cela nous considérons la structure présentée sur la figure (IV-18) où des interrupteurs commandables sont mis en place en amont et en aval de la batterie.

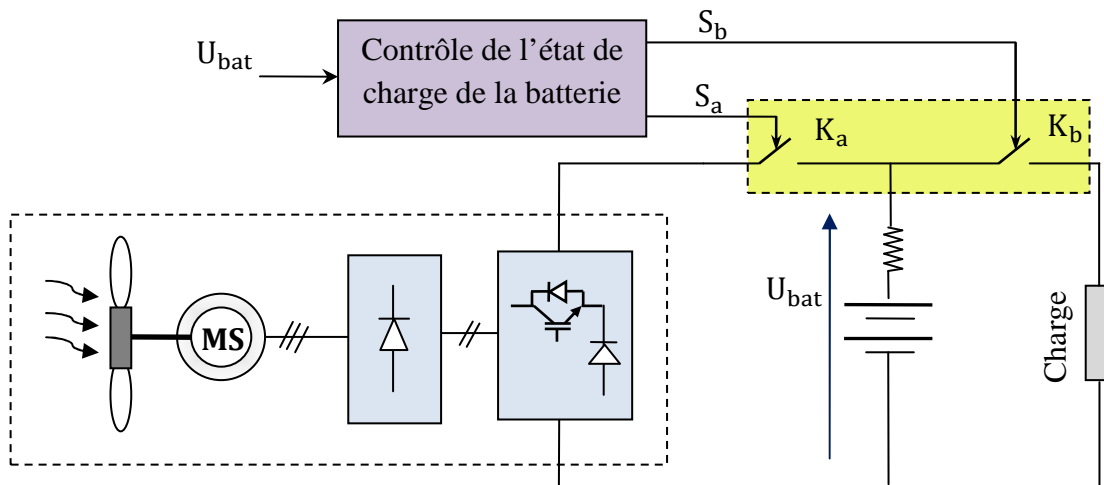


Figure IV-18 : Gestion de la charge dans la batterie

Typiquement, la batterie ne doit pas être déchargée à moins de 20% (la tension à ces bornes ne doit pas tomber au dessous de 80% de sa valeur nominale) ni surchargée à plus de 120%. Pour réaliser cet objectif, la mesure de la tension batterie en permanence est nécessaire.

Selon les limites définies, l'interrupteur K_a s'ouvre lorsque la tension batterie dépasse 14.4 V et reste ouvert jusqu'à ce que la tension tombe à 12 V. L'interrupteur K_b s'ouvre lorsque la tension devient inférieure à 9.6 V (charge à 80 %) et il restera ouvert jusqu'à ce que la tension devienne supérieure à 12 V (figure IV-19).

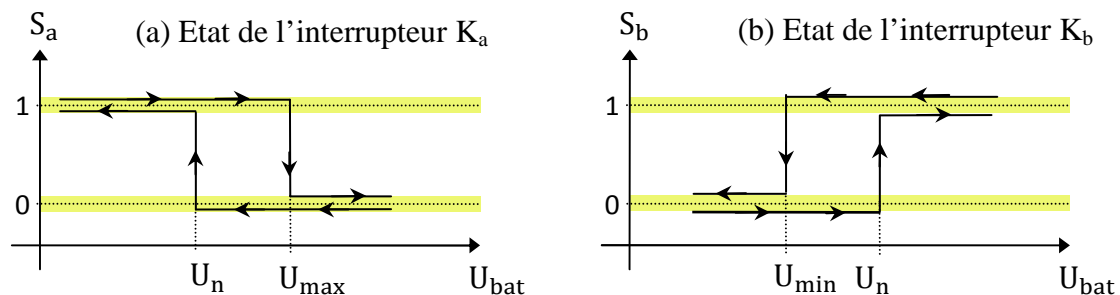


Figure IV-19 : Surveillance de l'état de charge de la batterie

Ces conditions de fonctionnement définissent des bandes d'hystérésis qui permettent d'éviter les basculements répétitifs inutiles des interrupteurs en cas de variations faibles de la tension de la batterie. Le tableau (IV-2) permet d'élaborer le circuit de commande de ces interrupteurs.

Tableau IV-2 : Commande des interrupteurs en amont et en aval de la batterie

| condition | $S_{a(i-1)}$ | $S_{a(i)}$ | condition | $S_{b(i-1)}$ | $S_{b(i)}$ |
|--------------------------------|--------------|------------|--------------------------------|--------------|------------|
| $U_{bat} \geq U_{bat_max}$ | 0 | 0 | $U_{bat} \leq U_{bat_min}$ | 0 | 0 |
| $U_{bat} < U_{bat_max}$ | 1 | 0 | $U_{bat} < U_{bat_min}$ | 1 | 0 |
| $U_n < U_{bat} < U_{bat_max}$ | 0 | 0 | $U_{bat_min} < U_{bat} < U_n$ | 0 | 0 |
| $U_n < U_{bat} < U_{bat_max}$ | 1 | 1 | $U_{bat_min} < U_{bat} < U_n$ | 1 | 1 |
| $U_{bat} \leq U_n$ | 0 | 1 | $U_{bat} \geq U_n$ | 0 | 1 |
| $U_{bat} \leq U_n$ | 1 | 1 | $U_{bat} \geq U_n$ | 1 | 1 |

7.2. Charge électrique

Pour nos simulations trois profils de vent de vitesses moyennes différentes ont été considérés (faible, moyenne et grande). Dans le but de mettre en évidence le rôle de la batterie et éclaircir son fonctionnement, la charge électrique (constituée par des résistances en parallèles) n'est pas la même pour tous les profils de vent (figure IV-20).

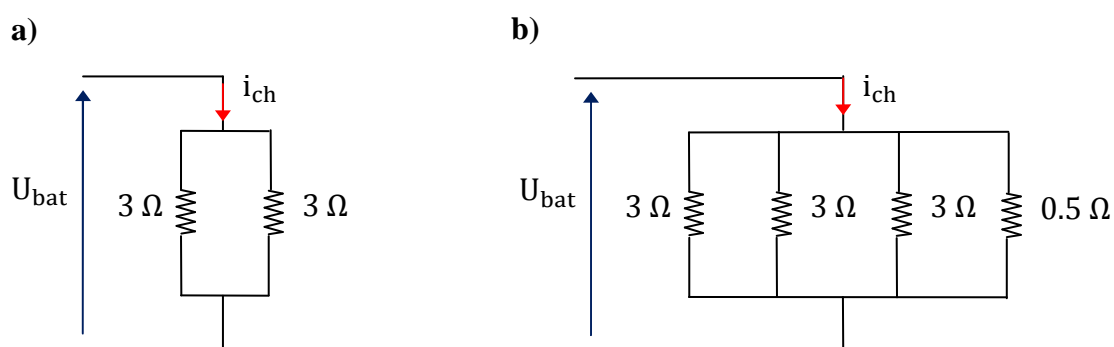


Figure IV-20 : Charge connectée aux bornes de la batterie : a) cas du vent faible et moyen, b) cas du vent fort

7.2. Résultats de simulation et interprétations

La figure (IV-21) donne les trois profils de la vitesse du vent utilisés dans la simulation sous Matlab\ Psim (la vitesse nominale est 10.55 m/s). Les résultats de simulation obtenus sont présentés par les figures (IV-22 à 27) selon les trois cas considérés.

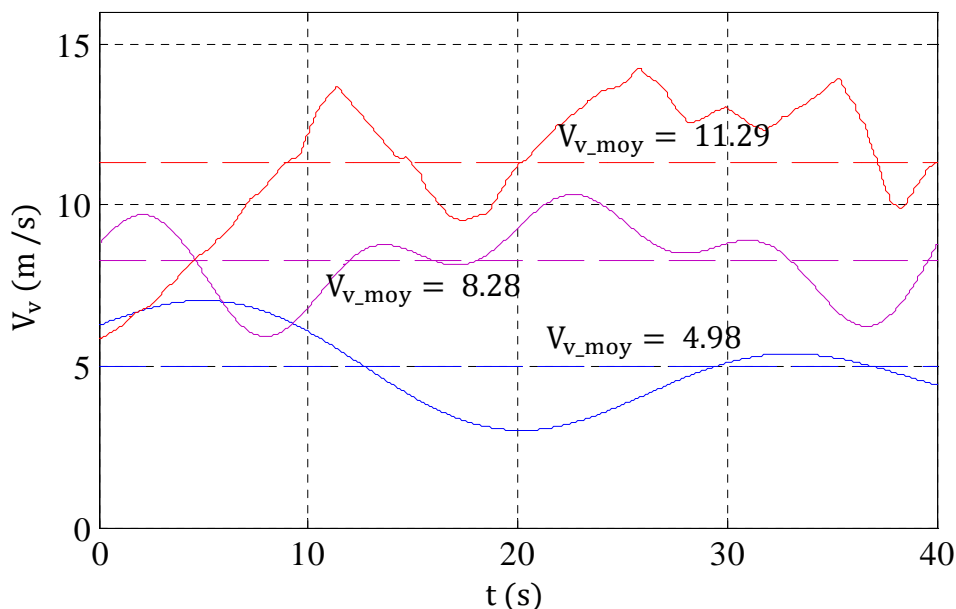


Figure IV-21 : Allures de la vitesse du vent utilisées en simulation

a) Cas du faible vent

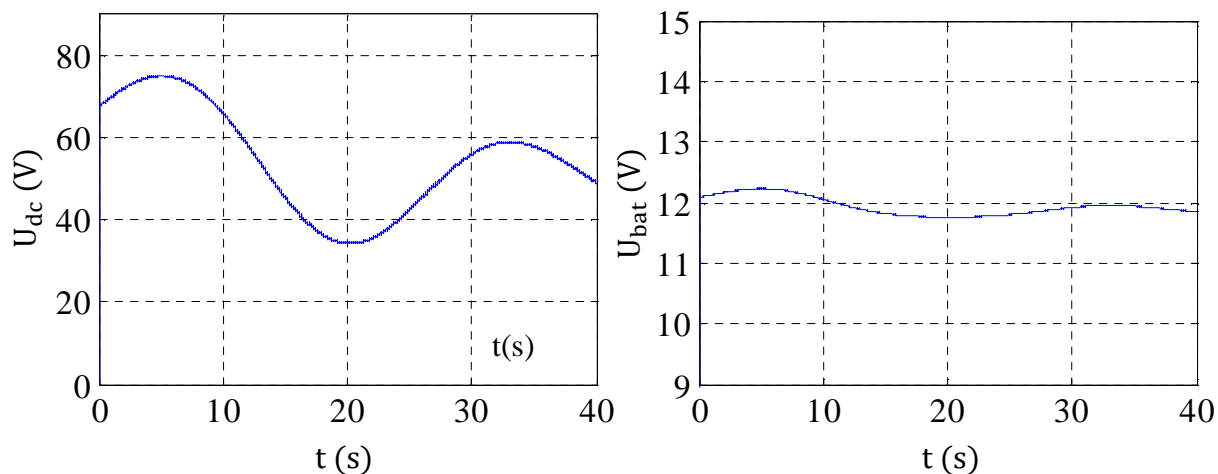


Figure IV-22: Tension à l'entrée du hacheur et aux bornes de la batterie : cas du vent faible

On constate sur la figure (IV-22) que les tensions suivent des variations qui correspondent au profil du vent imposé. Par rapport à la tension U_{dc} , la tension aux bornes de la batterie varie dans une bande très restreinte ou les limites maximale et minimale ne sont pas atteintes, c'est-à-dire que les interrupteurs K_a et K_b sont toujours fermés.

Le courant à la sortie du hacheur suit parfaitement sa référence (calculée par le bloc MPPT) et le courant dans la charge ainsi que la puissance restent constants (charge non variable). On peut remarquer qu'à partir de l'instant $t = 11s$ la batterie compense le déficit de puissance produite par l'éolienne en fournissant la puissance nécessaire à la charge (figure IV-23).

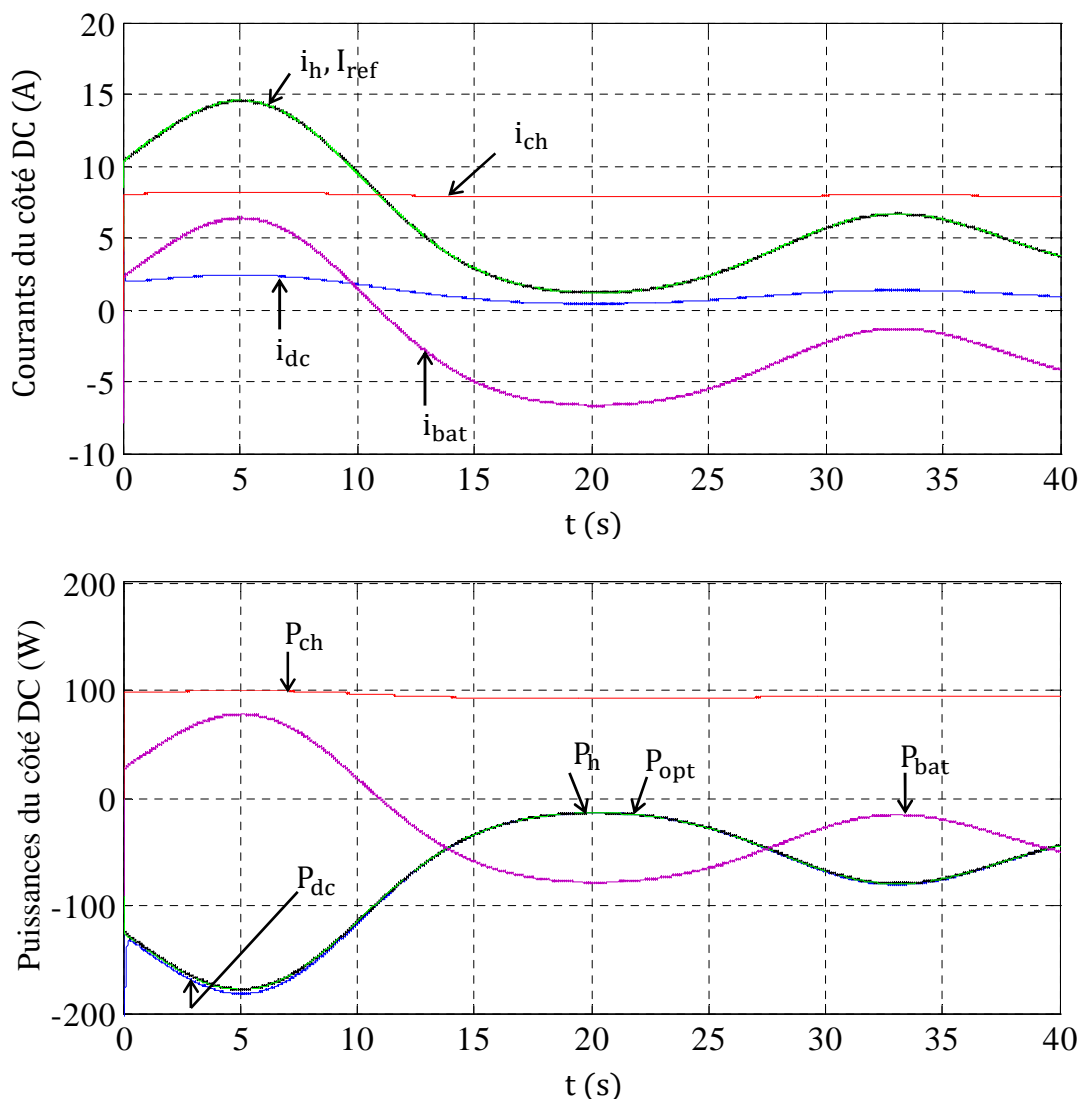


Figure IV-23: Courants et puissances en aval du redresseur à diodes : cas du vent faible

b) Cas du moyen vent

Dans ce cas la puissance produite par l'éolienne est suffisante pour alimenter la charge et charger la batterie, pour cela le courant dans la charge ainsi que la puissance sont toujours constants. Le courant dans la batterie varie avec le courant débité par le hacheur, ce qui fait que la tension aux bornes de la batterie subit les mêmes variations mais reste supérieure à la tension nominale (figure IV-24, 25)

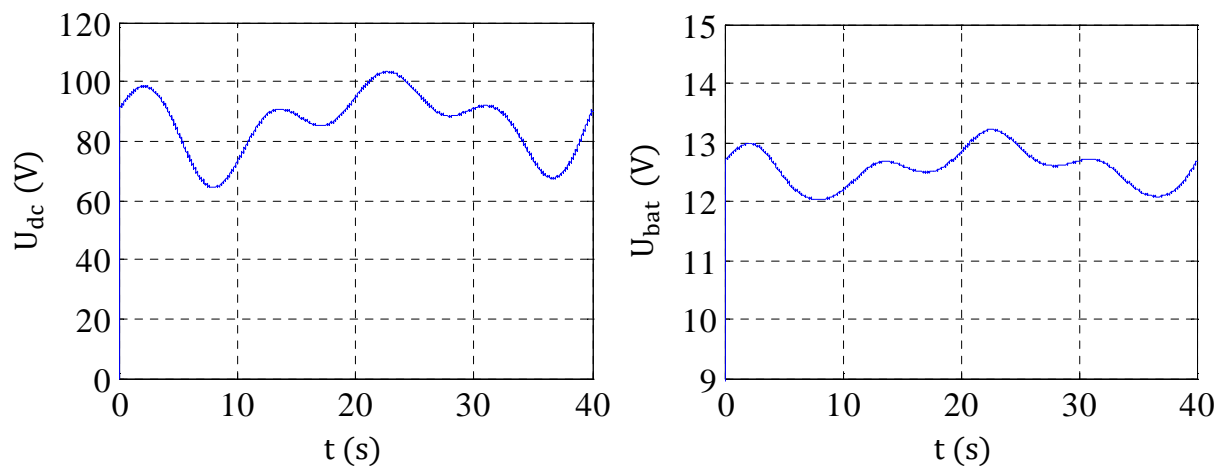


Figure IV-24: Tension à l'entrée du hacheur et aux bornes de la batterie : cas du vent moyen

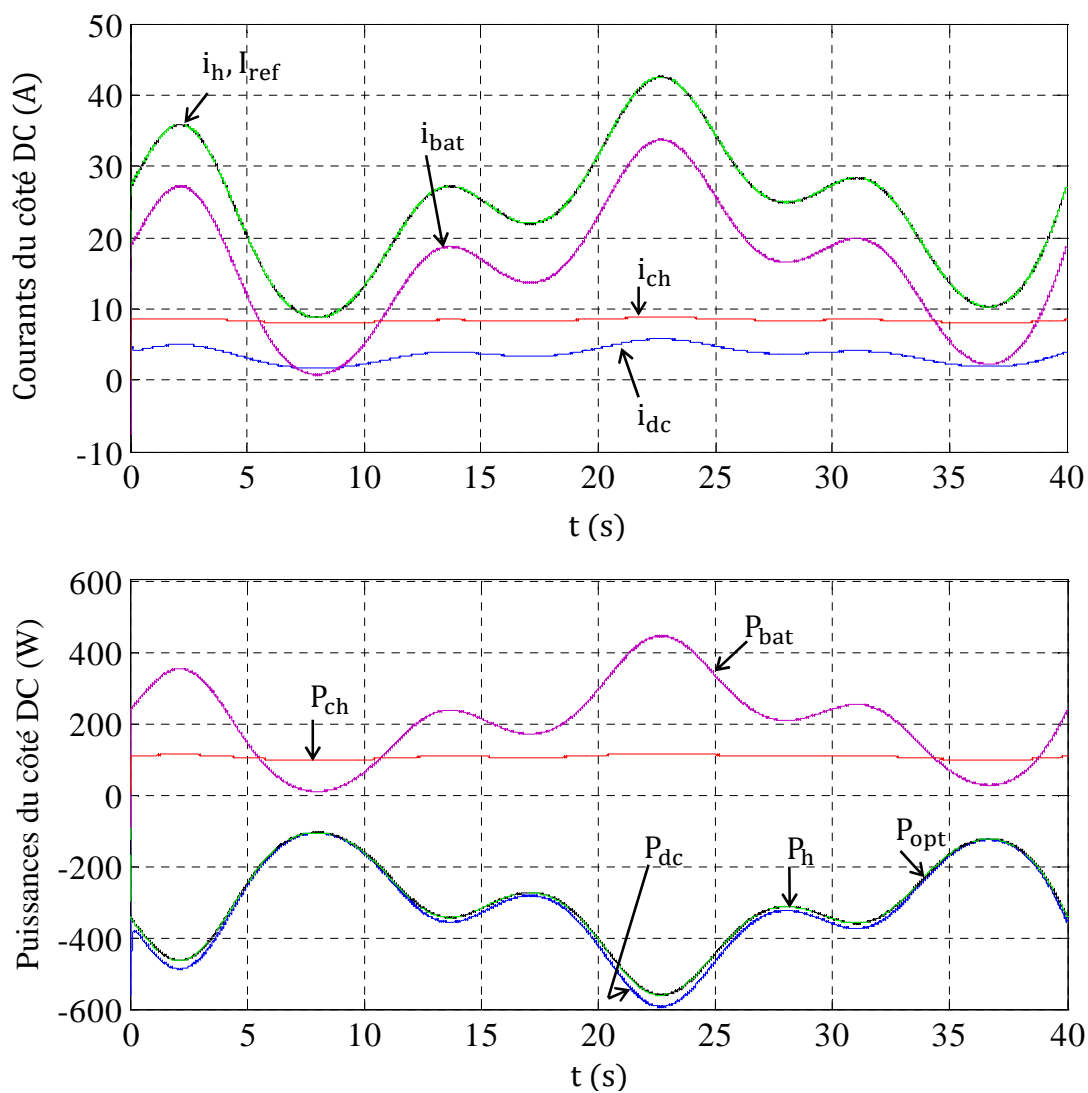


Figure IV-25: Courants et puissances en aval du redresseur à diodes : cas du vent moyen

c) Cas du fort vent

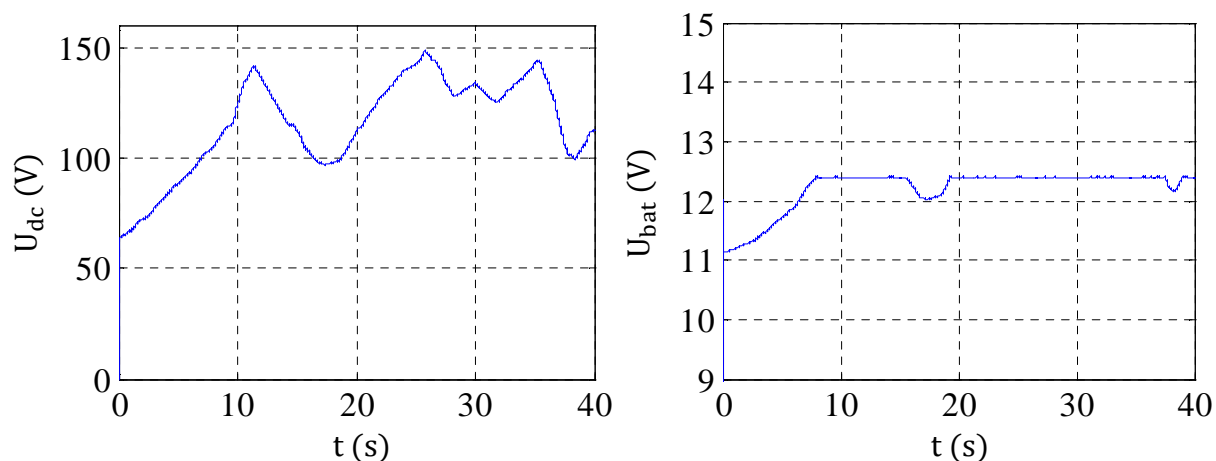


Figure IV-26: Tension à l'entrée du hacheur et aux bornes de la batterie : cas du fort vent

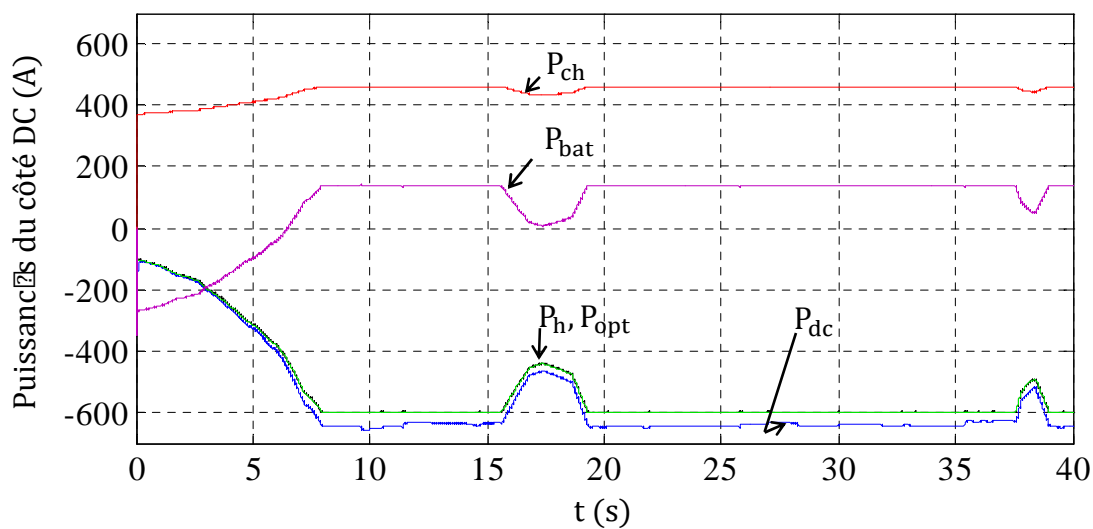
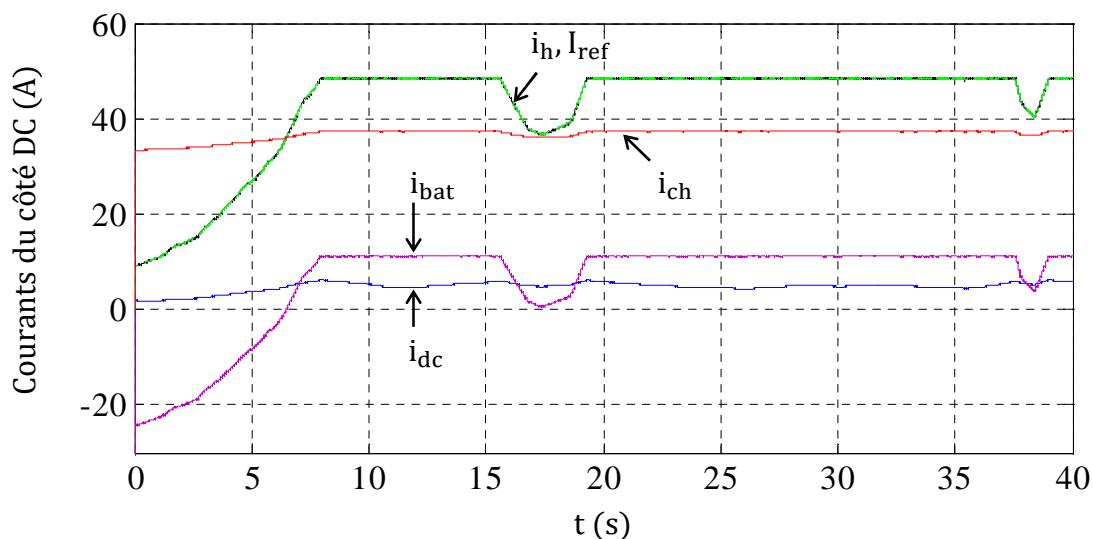


Figure IV-27: Courants et puissances en aval du redresseur à diodes : cas du fort vent

On remarque que la tension à l'entrée du hacheur U_{dc} augmente au-delà de sa valeur donnée pour une tension composée maximale (nominale) de la machine (105 V), malgré la limitation de puissance ; ce qui est dû à l'augmentation de la vitesse de rotation de la machine selon le mode de limitation de puissance décrit à la section (3.2.1).

La tension batterie est limitée à environ 12.5 V à cause de la limitation de puissance et de l'augmentation du courant demandé par la charge par rapport aux deux cas précédents (notons aussi que le modèle de la batterie utilisé dans la simulation est idéal).

La puissance consommée par la charge reste sensiblement constante. La puissance en amont du hacheur P_{dc} est supérieure à la puissance à sa sortie par la puissance dissipée dans ses composants (IGBT et diode) comme pertes Joule dans leurs résistances internes (17.5 m Ω).

Cela peut être l'un des inconvénients du hacheur dévolteur, car le courant à sa sortie se trouve important ce qui augmente significativement ses pertes Joule.

Néanmoins, on peut constater l'avantage de l'utilisation de l'MPPT du côté continu dans ce type de chaînes éoliennes afin de mieux optimiser la puissance produite. Cependant un dimensionnement adéquat du système est nécessaire à cet effet.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié une structure de conversion d'énergie éolienne de petite puissance fonctionnant en autonome. Cette structure, utilisant un redresseur à diodes et un hacheur abaisseur de tension, est associée à une stratégie de commande utilisant la méthode d'optimisation de puissance indirecte ne nécessitant pas la mesure de la vitesse du vent ni la connaissance de la courbe caractéristique $C_p(\lambda)$. Cette optimisation, utilisant la logique floue, permet aussi d'optimiser l'ensemble du système éolien en prenant en compte les pertes en amont de la batterie dans les deux cas considérés : batterie seule et batterie associée à une charge avec surveillance de l'état de charge\ décharge de la batterie.

Dans le cas de fortes vitesses du vent, une limitation de puissance est imposée au système éolien en raison des contraintes électriques et mécaniques sur les éléments de la chaîne de conversion. Cette limitation mène la génératrice à fonctionner au dessus de sa vitesse nominale (limitation à droite du point optimal sur la caractéristique $C_p(\lambda)$), ce fonctionnement offre de meilleures performances au prix d'un léger surdimensionnement de la chaîne de conversion.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons étudié le fonctionnement d'un aérogénérateur basé sur une MSAP. Nous avons abordé la problématique d'optimisation et de limitation de la puissance captée par la turbine éolienne dans une chaîne de conversion d'énergie raccordée au réseau électrique et en fonctionnement autonome.

Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de l'éolien et des différents moyens de stockage d'énergie est présenté dans le premier chapitre. La production d'électricité d'origine éolienne est de plus en plus importante et les performances des aérogénérateurs sont en évolution permanente afin d'améliorer le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques, d'améliorer la qualité de l'énergie produite et de diminuer le coût d'exploitation. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement des matériaux de construction et de l'électronique de puissance. Le pouvoir politique est aussi en grande partie moteur du développement durable.

Le stockage d'énergie est dans la plupart des cas indispensable avec les sources d'énergie renouvelable, et plus particulièrement avec la source éolienne, du faite de leur production irrégulière. De plus, il facilite l'association de plusieurs sources de production d'énergie (système hybride). La recherche dans le domaine des batteries électrochimiques, et bien dans d'autres domaines, apportent des solutions très attractives comme c'est le cas des batteries au lithium.

Afin d'améliorer le rendement énergétique d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, l'optimisation de la puissance captée par la turbine est nécessaire et à cause des contraintes mécaniques et électriques qui pèsent sur l'aérogénérateur pour les forts vents, la limitation de cette puissance est indispensable. Les méthodes classiques d'optimisation utilisent la mesure de la vitesse du vent et\ ou supposent connaître la caractéristique du fonctionnement optimal de la turbine (vitesse spécifique optimale et coefficient de puissance maximal correspondant). Du point de vue pratique, les erreurs de mesure et les paramètres d'optimisation non exacts peuvent détériorer le rendement énergétique. Cependant, l'utilisation de la méthode du gradient ou de la logique floue permet d'optimiser la puissance sans avoir besoin d'informations sur la turbine. L'algorithme de la logique floue donne des résultats meilleurs au prix d'un calcul plus important et d'un réglage parfois difficile.

La limitation de puissance est réalisable au niveau de la turbine par plusieurs techniques : Stall (actif ou passif), Pitch ou au niveau du générateur par une commande en vitesse. Dans ce dernier cas, la vitesse de rotation peut dépasser sa valeur nominale ce qui nécessite un léger surdimensionnement de la chaîne de conversion au bénéfice d'un fonctionnement plus stable.

L'utilisation de la MSAP à nombre de pôles élevé, permet de supprimer le multiplicateur de vitesse (réduire la taille et la maintenance du système), avoir un fonctionnement à vitesse variable et aux faibles vitesses, et offre l'avantage de ne pas avoir besoin d'une alimentation électrique au rotor. Cela contribue largement à augmenter l'efficacité énergétique du système.

Le cas du fonctionnement autonome étudié dans la dernière partie de ce travail montre l'efficacité d'un tel système dans les sites isolés. Néanmoins, il reste insuffisant pour une alimentation sans interruption, ce qui nécessite son association avec d'autres sources de production comme les panneaux photovoltaïques ou le groupe électrogène ou les deux au même temps.

Finalement, on peut envisager à la lumière de ce travail :

- L'étude d'autres méthodes non linéaires pour l'optimisation de puissance ;
- Etude plus approfondie des techniques de stockage d'énergie ;
- Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne raccordée au réseau avec prise en compte d'autres paramètres (saturation de la machine, réseau réel, prise en compte de toutes les pertes) ;
- Etude et dimensionnement d'un système hybride associé à la production éolienne, destinée à un site isolé avec prise en compte d'un modèle plus représentatif de la batterie et des convertisseurs statique (prise en compte de toutes les pertes).
- Concrétisation pratique de la dernière partie de ce travail sur un banc d'essai expérimental.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A.

[Aim04] : Aimani S., « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.

[Alt08]: Altas I.H., Sharaf A.M., « A Novel Maximum Power Fuzzy Logic Controller for Photovoltaic Solar Energy Systems », Science Direct, Renewable Energy Journal Vol. 33, pp. 388-399, 2008.

[Ana08]: Anagnostopoulos J.S., Papantonis D.E., «Simulation and Size Optimization of a Pumped-Storage Power Plant for the Recovery of Wind-Farms Rejected Energy », Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 1685-1694, 2008.

[And08]: Andújar J.M. and all, «A Suitable Model Plant for Control of the Set Fuel Cell-DC/DC Converter», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 813-826, 2008.

[Aou09]: Aouzellag D. and all, "Network Power Flux Control of a Wind Generator", Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.

[Aya04]: Ayad M.Y., «Mise en Œuvre des Supercondensateurs dans les Sources Hybrides Continues », Thèse de Doctorat, INPL, France, 2004.

B.

[Bar07]: Baroudi J.A. and all, «A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators », Science Direct, Renewable Energy Journal Vol. 32, pp. 2369-2385, 2007.

[Bel01]: Belhachemi F., «Modélisation et Caractérisation des Supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance », Thèse de Doctorat, INPL, France, 2001.

[Bia06]: Bia Y. and all, « Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial applications », Springer-Verlag London, 2006.

[Bo09]: Bo C. and all, «Ni-MH Battery State-of-Charge Prediction Based on Immune Evolutionary Network», Science Direct, Energy Conversion And Management Journal, Vol. 50, pp. 3078-3086, 2009.

[Bro99]: Broe A.M. and all, « A Peak Power Tracker for Small Wind turbines in battery Charging Applications», IEEE Transactions on Energy Conversion , Vol. 14, No. 4, pp. 1630-1635, December, 1999.

C.

[Cam03] : Camblong H., « Minimisation de l'Impact des Perturbation d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[Cap02] : Capitaneanu S.L., « Optimisation de la Fonction MLI d'un Onduleur de Tension Deux-Niveaux » Thèse de Doctorat, INPT, France, 2002.

[CEA04] : Commissariat à l'Energie Atomique, « L'Hydrogène », Livret Thématique, CEA-Direction de la Communication, France, 2004.

[Cim05] : Cimuca G.O., « Système Inertiel de Stockage d'Energie Associé à des Générateurs Eoliens », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers, France, 2005.

[Cou05] : Couffin S., Perrin M., « Le Stockage des Energies Intermittentes », CLEFS CEA-N°50/51 pp. 136-138, hiver 2004-2005.

D.

[Den06] : Denherder T., « Design and Simulation of Photovoltaic Super System Using Simulink », Senior Project, California Polytechnic State University, 2006.

[Der07] : Derbal H. et all, « L'hydrogène, Vecteur Energétique Solaire », Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen, pp. 41-46, 2007.

[Dil04] : Dillenseger G., « Caractérisation de Nouveaux Modes de Maintien en Charge pour Batteries Stationnaires de Secours », Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 2004.

[Dou01] : Douine B., « Etude des Pertes dans les Supraconducteurs à Haute Température Critique », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2001.

[Duf08] : Dufo-López R. and all, « Optimization of Control Strategies for Stand-Alone Renewable Energy Systems with Hydrogen Storage », Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 32, pp. 1102-1126, 2007.

E.

[EWEA09] : European Wind Energy Association « Pure Power: Wind Energy Targets for 2020 and 2030 », Rapport de l'Association Européenne de l'Energie Eolienne, Novembre 2009. www.ewea.com

F.

[Fer07] : Fernando D.B. and all, « Wind Turbine Control Systems: Principles, Modeling and Gain Scheduling Design », Springer-Verlag London, 2007.

[Fon09]: Fonseca C.P. and all, «Synthesis and Characterization of $\text{LiM}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ (M=Al, Bi and Cs Ions) Films for Lithium Ion Batteries», Science Direct, Energy Conversion and Management Journal, Vol. 50, pp. 1556-1562, 2009.

G.

[Gom05]: Gombert C., « Simulation Temps-Réel des Dispositifs d'Electronique de Puissance Dédiés aux Réseaux d'Energie Electrique », Thèse de Doctorat, INPG, France, 2005.

H.

[Ham08]: Hamrouni N. and all, « New Control Strategy for 2-Stage Grid-Connected Photovoltaic System», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 2212-2221, 2008.

[Han01]: Hansen L.H. and all, « Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines», IECO'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2000-2005, December, 2001.

[Hua08]: Huang K.L. and all, «Research Progress of Vanadium Redox Flow Battery for Energy Storage in China», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 186-192, 2008.

J.

[Jan08]: Jankowska E. and all, «Electrochemical Performance of Sealed Ni-MH Batteries using nanocrystalline TiNi-Type Hydride Electrodes», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 211-215, 2008.

[Jea99]: Jean Paul L., Claude B., « Commande Numérique des Machines Synchrones », Techniques d'Ingénieur, Référence D3644.

[Jea06]: Jean Claude S., « Nouvelles Technologies de l'Energie 1 : Les Energies Renouvelables », Edition Hermès, 2006.

[Jea07]: Jean Claude S., « Nouvelles Technologies de l'Energie 2 : Stockage à Emission Réduite », Edition Hermès, 2007.

K.

[Kor08]: Korpas M., Greiner C.J., «Opportunities for Hydrogen Production in Connection with Wind Power in Weak Grids», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 813-826, 2008.

L.

[Lav05]: Laverdure N., « Sur l'Intégration des Générateurs Eoliens dans les Réseaux Faibles ou Insulaires », Thèse de Doctorat, INPG, France, 2005.

[Let08]: Lethé M., « Les Renouvelables, enfin » Magazine de l'espace européen de la recherche, Numéro spécial, Avril 2008.

[Lun09]: Lund H., Salgi G., «The Role of Compressed Air Energy Storage (CAES) in Future Sustainable Energy Systems», Science Direct, Energy Conversion and Management Journal, Vol. 50, pp. 1172-1179, 2009.

M.

[Mar05a]: Martinet S., «Nouvelles Voix dans les Accumulateurs Lithium et les Electrolytes de Batteries », CLEFS CEA-N°50/51 pp. 130-133, Hiver 2004-2005.

[Mar05b]: Martinet S. et all, «Vers de Nouveaux Electrolytes de Batteries », CLEFS CEA-N°50/51 pp. 135, hiver 2004-2005.

[Mir05]: Mirecki A., « Etude Comparative de Chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », Thèse de Doctorat, INPT, France, Avril 2005.

[Moh03]: Mohan N., «First Course on Power Electronics and Drives », Département du Génie Electrique et Informatique, Université de Minnesota, Edition MNPERE, USA, 2003.

[Mon06]: Monroy A. and all, "Real-time Identification of Wind Turbine Rotor Power Coefficient", Proceeding of 45th IEEE Conference on Decision and Control, USA, pp. 3690-3695, December 13-15, 2006.

[Mul99]: Muljadi E. and all «Axial-Flux Modular Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind-Turbine Applications», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 4, pp. 831-836, July/August, 1999.

[Mul01]: Muljadi E., « Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, pp. 240-246, January/ February, 2001.

[Mul04]: Multon B. et all, « Aérogénérateurs Electriques », Techniques d'Ingénieur, Référence D3960, 2004.

[Mun08]: Munteanu I. and all, « Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach », Springer-Verlag London, 2008.

[Muy09]: Muyeen S.M. and all, « Stability Augmentation of a Grid-Connected Wind Farm », Springer-Verlag London, 2009.

N.

[**Nah01**]: Nahid M. B., « Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants: Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification en Ligne des Paramètres », Thèse de Doctorat, INPL, France, Décembre 2001.

[**Ngo05**]: Ngô C., «Energie d'aujourd'hui et de demain », CLEFS CEA-N°50/51 pp. 5-8, Hiver 2004-2005.

P.

[**Poi03**]: Poitiers F., « Etude et Commande de Génératrices Asynchrone pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.

[**Pou95**]: Poul C.K., Oleg W., Scott D.S., « Analysis of Electric Machinery», IEEE Press, New York, 1995.

R.

[**Ros09**]: Rostami A., Asaei Behzad., «A Novel Method for Estimating the Initial Rotor Position of PM Motors without the Position Sensor », Science Direct, Energy Conversion and Management Journal, Vol. 50, pp. 1879-1883, 2009.

[**Rys08**]: Ryszard S., Grzegorz B., «Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks», Springer-Verlag London, 2008.

S.

[**Sai04**]: Saisset R., «Contribution à l'Etude Systémique de Dispositifs Énergétiques à Composants Electrochimiques », Thèse de Doctorat, INPT, France, Avril 2004.

[**San08**]: Sánchez J.A. and all, «Dynamic model of Wind Energy Conversion Systems with Variable Speed Synchronous Generator and Full-Size Power Converter for Large-Scale Power System Stability Studies», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 1186-1198, 2008.

T.

[**Taf01**]: Tafticht T., « DC Bus Control of Variable Speed Wind Turbine Using a Buck-Boost Converter», IEEE Transactions on Power Systems, 2006.

[**Taf08**]: Tafticht T. and all, «An Improved Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Systems », Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 1508-1516, 2008.

[Tha10]: Thameem-Ansari M.Md, Velusami S., «Duel Mode linguistic Hedge Fuzzy Logic Controller for Isolated Wind-Diesel Hybrid Power System with Superconducting Magnetic Energy Storage unit », Science Direct, Energy Conversion And Management Journal, Vol. 51, pp. 169-181, 2010.

V.

[Via05] : Viarouge F., « Les Super Condensateurs », Mag. CHOC, Octobre 2008.

Y.

[Yin08]: Ying-Yi H. and all, «MPPT for PM Wind Generator using Gradient Approximation», Science Direct, Energy Conversion and Management Journal, Vol. 50, pp. 82-89, 2009.

Z.

[Zho08]: Zhou W. and all, « Battery Behavior Prediction and Battery Working Stats Analysis of a Hybrid solar-Wind Power generation System», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 1413-1423, 2008.

A.1. Paramètres des turbines utilisées dans la simulation

Les principaux paramètres des turbines éoliennes traitées dans ce travail sont donnés dans le tableau (A-1).

Tableau A-1 : Paramètres des turbines éoliennes [Lav05]

| Paramètres | Puissance nominale | | |
|---|--------------------|--------|---------|
| | 400 W | 600 W | 660 kW |
| N (tr /min) : Vitesse de rotation nominale | 500 | 176.47 | 46.875 |
| R (m) : Rayon de la turbine | 0.585 | 0.81 | 20.41 |
| J (Kg.m²) : Inertie | 0.68 | 0.8 | 222 963 |
| f (N.m.s/rad) : Coefficient de frottement | 0.0002 | 0.0002 | 743.21 |
| V_{nom}(m/s) : Vitesse nominale du vent | 12.5 | 10.5 | 12.6 |
| λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale | 2.45 | 1.42 | 7.95 |
| C_{p_max} : Coefficient de puissance maximal | 0.3109 | 0.40 | 0.411 |

Les fonctions $C_p(\lambda)$ relatives aux trois turbines éoliennes sont données par les polynômes suivants (les deux premiers polynômes sont obtenus par interpolation polynômiale):

Pour l'éolienne de 400 W :

$$C_p(\lambda) = -0.005 \lambda^5 - 0.0347 \lambda^4 + 0.0099 \lambda^3 + 0.2454 \lambda^2 - 0.2197 \lambda + 0.0373$$

Pour l'éolienne de 600 W :

$$C_p(\lambda) = -0.0193 \lambda^5 + 0.2228 \lambda^4 - 0.84 \lambda^3 + 1.0628 \lambda^2 - 0.0959 \lambda + 0.007$$

Pour l'éolienne de 660 kW [Mon06]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(116 \frac{1}{\delta} - 0.4 \beta - 5 \right) e^{-21 \frac{1}{\delta}}$$

Avec :

$$\frac{1}{\delta} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

A.2. Paramètres des MSAP utilisées dans la simulation

Les paramètres des MSAP de 600 W et de 660 kW sont résumés dans le tableau (A-2).

Tableau A-2 : Paramètres des MSAP [Lav05, Mir05]

| Paramètres | Puissance nominale | |
|--|--------------------|--------|
| | 600 W | 660 kW |
| R_s (Ω) : Résistance d'une phase statorique | 1.137 | 0.01 |
| L_d, L_q (H): Inductances directe et quadratique | 0.0024 | 0.001 |
| J (Kg.m^2) : Inertie | 0.1 | 3800 |
| f (N.m.s/rad): Coefficient de frottement | 0.06 | 26.75 |
| p : Nombre de paires de pôles | 17 | 64 |
| Φ_f (Wb): Flux d'excitation | 0.14 | 2.57 |
| V_n (V) : Tension nominale | 52 | 690 |

A.3. Paramètres de la chaîne de conversion raccordée au réseau électrique (chapitre III)

Les paramètres du bus continu, du filtre et du réseau sont donnés dans le tableau (A-3)

Tableau A-3 : Paramètres de la chaîne de conversion raccordée au réseau électrique

| | Paramètres | Valeur numérique |
|-------------|-----------------------------|------------------|
| Bus Continu | Capacité (F) | 0.015 |
| | Tension (V) | 1500 |
| Filtre | Résistance (Ω) | 0.01 |
| | Inductance (H) | 0.001 |
| Réseau | Tension simple efficace (V) | 690 |
| | Fréquence (Hz) | 50 |

A.4. Calcul des régulateurs PI

A.4.1. Structure du régulateur

La fonction de transfert d'un régulateur PI classique est donnée par l'expression suivante :

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (\text{A-1})$$

K_p : Gain proportionnel du correcteur ;

K_i : Gain intégral du correcteur (s est l'opérateur de Laplace).

L'expression (A-1) peut se mettre aussi sous la forme suivante :

$$C(s) = K_p \frac{1+T_i s}{T_i s} \quad (\text{A-2})$$

Tel que : $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ est la constante de temps du régulateur

Le schéma bloc du correcteur PI correspondant aux deux expressions (A-1) et (A-2) est donné sur la figure (A-1).

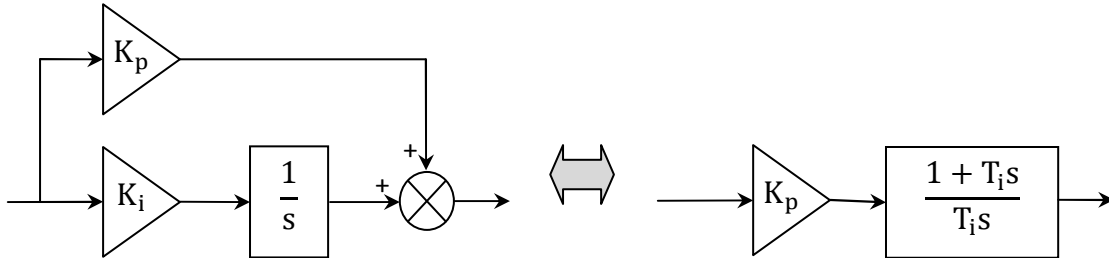


Figure A-1 : Schéma bloc d'un régulateur PI

A.4.2. Calcul des paramètres

On considère un processus dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(s) = \frac{k}{1 + \tau s} \quad (\text{A-3})$$

Tel que : k est le gain statique, τ est la constante de temps du processus.

La régulation du processus en utilisant un correcteur PI est présentée par la figure (A-2).

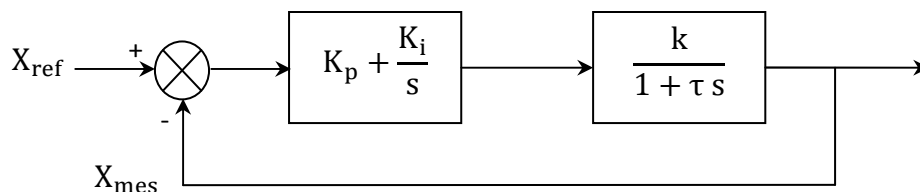


Figure A-2 : Schéma bloc d'un régulateur PI

Afin de calculer les régulateurs de vitesse, on a considéré une fonction de transfert de second ordre. En effet, la fonction de transfert en boucle fermée relative au schéma de la figure (A-2) est exprimé par :

$$H(s) = \frac{1 + T_i s}{1 + T_i \frac{1 + k K_p}{k K_p} s + \frac{T_i \tau}{k K_p} s^2} \quad (\text{A-4})$$

Le dominateur de la fonction de transfert $H(s)$ (de second ordre) est de la forme :

$$D(s) = 1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2 \quad (\text{A-5})$$

Tel que : ζ est le coefficient d'amortissement, ω_n est la pulsation propre.

$$\begin{cases} K_i = \frac{\tau \omega_n^2}{k} \\ K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_n} - \frac{1}{k} \end{cases} \quad (\text{A-6})$$

Les paramètres ζ et ω_n sont choisis pour avoir une réponse stable, rapide et précise, en effet :

Pour $\zeta = 0.7$, on a $t_r \omega_n = 3$ (t_r est le temps de réponse choisi), alors $\omega_n = t_r/3$.

Pour le calcul des autres régulateurs, on a considéré une fonction de transfert en boucle fermée du premier ordre qui s'exprime par :

$$F(s) = \frac{1}{1+T_f s} \quad (\text{A-7})$$

D'autre part :

$$F(s) = \frac{C(s) G(s)}{1+C(s) G(s)} \quad (\text{A-8})$$

On en déduit alors l'expression de $C(s)$ qui s'identifie à un régulateur PI :

$$C(s) = \frac{1+\tau s}{kT_f s} = \frac{\tau}{kT_f} \frac{1+\tau s}{s} \quad (\text{A-9})$$

En comparant les expressions (A-2) et (A-9), on déduit :

$$\begin{cases} T_i = \tau \\ K_p = \frac{\tau}{kT_f} \end{cases} \quad (\text{A-10})$$

Les paramètres des régulateurs utilisés dans ce travail sont résumés dans le tableau (A-4).

Tableau A-4 : Paramètres des régulateurs PI

| Objectif de correcteur | Paramètres du PI | |
|--|-----------------------|---------|
| | K_p | T_i |
| Asservissement de vitesse de la turbine 400 W | 20 | 0.05 |
| Asservissement de vitesse de la turbine 600 W | 100 | 0.05 |
| Asservissement de vitesse de la turbine 600 kW | 11.3637×10^6 | 10.0467 |
| Régulation de vitesse de la MSAP 600 kW | 400 | 0.22 |
| Régulation de la tension du bus continu | 20 | 0.1 |
| Régulation des courants envoyés au réseau électrique | 100 | 0.001 |
| Régulation du courant dans la batterie | 2.5 | 0.0024 |

NOTIONS DE BASES SUR LA LOGIQUE FLOUE

Cette section n'a pas pour but de donner un état des lieux complet de la logique floue, mais uniquement de fournir quelques notions de base de la logique floue.

Introduction

L'idée de la logique floue est inventée par le professeur L. A. Zadeh de l'université de Berkeley en Californie en 1965. Cette idée trouve sa première application expérimentale en 1974 grâce au Dr. E. H. Mamdani de l'université de London, puis une réelle application industrielle pour la régulation du four d'une cimenterie réalisée par deux sociétés danoises. A partir de 1980, la logique floue trouve son application dans plusieurs domaines [Muy09].

L'implantation de la technique de la logique floue passe par les trois étapes suivantes :

- Fuzzification : conversion des données classiques (valeurs numériques) vers des variables floues ou des fonctions d'appartenance ;
- Processus d'inférence : combiner les fonctions d'appartenance avec les règles de contrôle pour dresser les variables floues de sortie ;
- Défuzzification : conversion des variables floues vers des valeurs numériques.

B.1. Ensembles flous

Dans la logique classique un élément appartient à un ensemble ou n'appartient pas, sa fonction caractéristique prend la valeur 1 ou 0 respectivement. Dans la logique floue toutes les valeurs comprises entre 0 et 1 sont possibles ; un tel sous-ensemble dont les éléments ont cette propriété est appelée sous-ensemble flou.

Les éléments, dans la logique floue, peuvent appartenir à plusieurs ensembles flous simultanément avec des degrés d'appartenance partielle différents. Soit l'exemple de la température définie par trois ensembles : faibles températures (0-30°C), moyennes températures (30-70°C), températures élevées (70-120°C).

Ces trois ensembles sont définis du point de vue classique. Une valeur quelconque de la température entre 0 et 120°C, peu appartenir seulement à un seul ensemble, soit faible, moyenne ou élevée. En introduisant la notion d'ensembles flous, l'appartenance de cette valeur à deux ensembles ou aux trois ensembles simultanément devient possible (figure B-1).

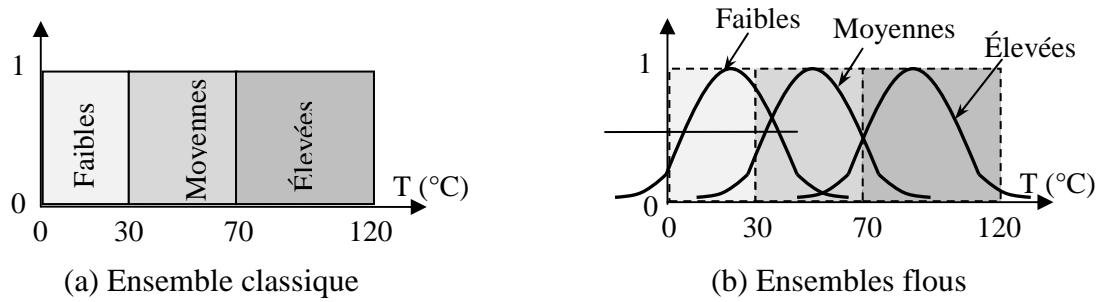


Figure B-1 : Ensembles classiques et ensembles flous

Sur la figure (B-1b) on peut remarquer que la température 40°C appartient à l'ensemble des faibles températures à un degré de 0.5 et au même temps elle appartient à l'ensemble des moyennes températures à un degré de 0.7. Une autre valeur intéressante est la valeur 55°C , en effet cette valeur appartient aux trois ensembles simultanément (faible et élevée à 10% et moyenne à 90% approximativement).

Une fois les ensembles flous définis, des opérations mathématiques concernant ce type d'ensembles ont été développées. Les opérateurs mathématiques élaborés ressemblent beaucoup à ceux reliés à la théorie des ensembles conventionnels. Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation sont traduites par les opérateurs "ET, OU et NON respectivement. Soit A et B deux ensembles flous, dont les fonctions d'appartenance sont $\mu_A(x)$, $\mu_B(y)$ respectivement. Les fonctions utilisées pour réaliser les différentes opérations floues de base sont (opérateurs de Zadeh) :

- Intersection (opérateur ET) : $\min(\mu_A(x), \mu_B(y))$;
- Union (opérateur OU) : $\max(\mu_A(x), \mu_B(y))$;
- Complément (opérateur NON) : $1 - \mu_A(x)$.

La figure (B-2) représente ces opérateurs graphiquement.

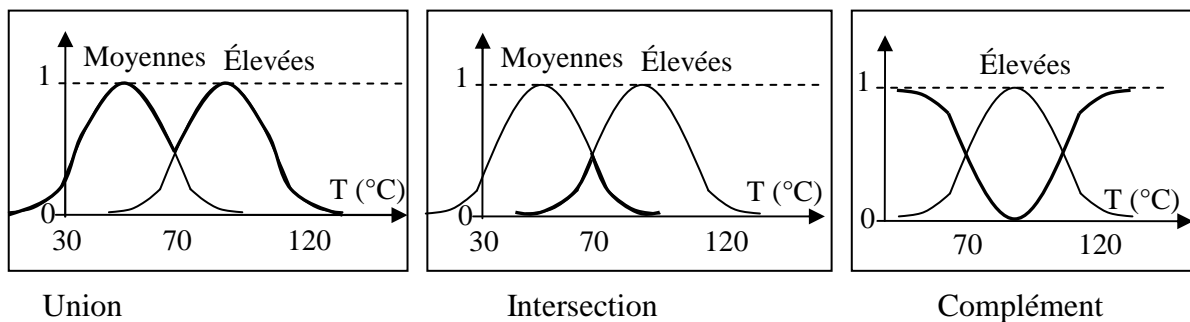


Figure B-2 : Opérations sur les ensembles flous

B.2. Fuzzification et fonctions d'appartenances

La fuzzification est la première étape dans le processus de la logique floue. Généralement, elle requiert deux processus : définition des variables linguistiques et détermination du degré d'appartenance des entrées à travers les fonctions d'appartenances utilisées.

B.2.1. Variables linguistiques

Le concept des variables linguistiques joue un rôle important dans le domaine de la logique floue. Une variable linguistique comme son nom le suggère, est une variable définie à base de mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet, la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme "quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ...etc.". Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue.

B.2.1. Fonctions d'appartenance

Un ensemble flou est défini sur l'univers de discours X (plusieurs ensembles floues peuvent être définis sur le même univers de discours) par sa fonction d'appartenance qui correspond à la fonction caractéristique en logique booléenne. La fonction d'appartenance peut avoir plusieurs formes (triangulaire, trapézoïdale, gaussienne,... etc.) comme le montre la figure (B-3). Le choix de la forme des fonctions d'appartenance dépend de l'application visée.

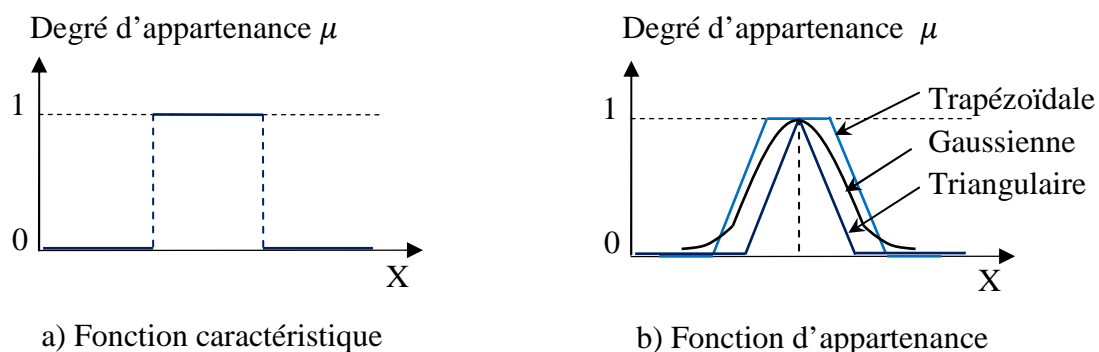


Figure B-3 : Différence entre la logique classique et la logique floue

Prenant l'exemple de trois intervalles de température définis cette fois ci du point de vue des ensembles flous comme suit :

Faibles températures (FT): $0\text{ °C} \leq T \leq 30\text{ °C}$, centre de l'intervalle : 15 °C

Moyennes températures (MT): $20\text{ °C} \leq T \leq 50\text{ °C}$, centre de l'intervalle : 35 °C

Grandes températures (GT): $40\text{ °C} \leq T \leq 70\text{ °C}$, centre de l'intervalle : 55 °C

L'univers de discours et la température, les variables linguistiques sont FT, MT et GT. L'ensemble flou des faibles températures sera défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle $[0,1]$. Autrement dit, chaque température correspond à un degré d'appartenance à l'ensemble flou des faibles températures, compris entre 0 et 1. La figure (B-4) représente l'étape de fuzzification par des fonctions triangulaires.

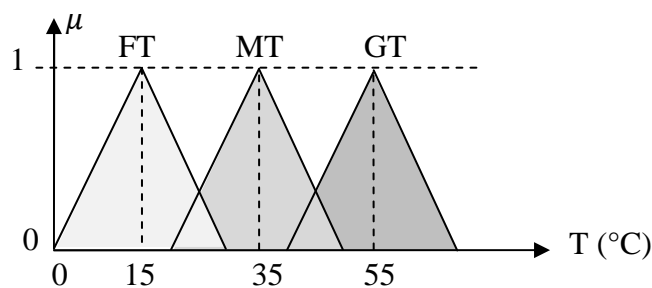


Figure B-4 : Fuzzification et degré d'appartenance

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue sur l'appartenance des éléments aux ensembles définis. La détermination du degré d'appartenance s'effectue à l'aide de fonctions mathématiques et des opérateurs de la logique floue définis précédemment.

B.3. Règles floues et processus d'inférence

Les règles floues traduisent l'expérience et les connaissances d'un opérateur relié à un domaine ou une application données. Elles sont représentées par des séquences de la forme : SI (condition) ALORS (conclusion), laissant ainsi l'algorithme de décider de l'action à prendre en termes des informations disponibles.

Pour la plupart des applications de la logique floue, l'entrée est composée de deux variables. Dans ce cas, la règle floue est exprimée à l'aide d'une implication (inférence) entre deux propositions floues désignées par des variables linguistiques et séparés par un opérateur flou.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et de la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons :

- **Linguistiquement** : dans ce cas, on exprime les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant :
 "Si l'accélération est faible **ET** la vitesse est faible **Alors** faire appel à un grand couple".
- **Symboliquement** : il s'agit, dans ce cas, d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des symboles tels que GP, MP,...etc. désignant (Grand Positif, Moyen Positif,...etc.)
- **Par matrice d'inférence** : dans ce cas, on rassemble toutes les règles qui sont désignées symboliquement dans un tableau appelé « matrice d'inférence ». Les entrées du tableau représentent les degrés d'appartenance des variables linguistiques des entrées aux différents ensembles flous. Et l'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de sortie défini par la règle.

B.4. Défuzzification

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit « de Mamdani ». Dans ce cas, la conclusion est toujours une variable floue nécessitant ainsi passage au domaine réel via le processus de défuzzification. Les méthodes de défuzzification les plus couramment utilisées sont : méthode de la moyenne des maximums, méthode du maximum et la méthode du centre de gravité.

B.4.1. Méthode de Maximum

Cette méthode génère une commande qui représente l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette méthode est simple, rapide et facile, mais présente certains inconvénients lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale et ne tient pas compte de l'effet de toutes les règles.

B.4.2. Méthode de la moyenne des maximums

Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de tous les maximums, dans le cas où il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

B.4.3. Méthode du centre de gravité

Cette méthode génère une commande égale à l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette abscisse de centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante :

$$S_{CG} = \frac{\sum (\mu_i x_i)}{\sum \mu_i}$$

Tels que x_i et μ_i sont les éléments de l'ensemble floue et leurs degrés d'appartenance respectivement.

Cette méthode est la plus utilisée dans les systèmes de commande floue, (car elle tient compte de toutes les règles et ne présente pas une confusion de prise de décision), malgré sa complexité, puisqu'elle demande des calculs importants.

B.4. Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont :

- ✓ Modélisation mathématique rigoureuse du processus non nécessaire;
- ✓ La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- ✓ La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser) ;
- ✓ La réduction du temps de développement et de maintenance ;
- ✓ La simplicité de définition et de conception.

Par contre, les inconvénients sont :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification) ;
- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile) ;
- La difficulté de montrer la stabilité dans tous les cas ;
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié le fonctionnement d'un aérogénérateur basé sur une MSAP. Nous avons abordé la problématique d'optimisation et de limitation de puissance dans la chaîne de conversion raccordée au réseau électrique et en fonctionnement autonome. Le premier chapitre présente les principales configurations d'aérogénérateurs résultant des différentes combinaisons entre machines électriques et convertisseurs statiques. Les différentes techniques de stockage d'énergie sont également décrites dans cette partie. Le deuxième chapitre aborde les techniques d'optimisation de puissance (méthodes conventionnelles, méthode du gradient et la logique floue) et de limitation de puissance (Stall actif, Stall passif, Pitch et limitation par une commande électrique du générateur). Le troisième chapitre illustre le comportement dynamique d'un aérogénérateur connecté au réseau électrique et sa commande. Deux modes d'optimisation et de limitation de puissance sont considérés ; optimisation par la méthode conventionnelle et limitation de puissance par la technique Pitch dans un premier temps et optimisation par la logique floue et limitation de puissance par une commande purement électrique du générateur dans un second temps. Le dernier chapitre concerne le fonctionnement autonome d'une éolienne de faible puissance comportant un redresseur à diode, un hacheur dévolteur et une batterie de stockage d'énergie. L'optimisation et la limitation de puissance sont réalisées par une commande du hacheur (MPPT du côté DC) à partir de la régulation du courant dans la batterie de stockage.

Mots Clés : *turbine éolienne à vitesse variable, MSAP, MPPT, techniques d'optimisation, connexion au réseau électrique, fonctionnement autonome.*

Abstract

In this work, we have studied the wind energy conversion system based on PMSG. The problematic of optimization and limitation of power was described in the system connected to the grid and in autonomous case. The first chapter presents the principals configurations of wind energy conversion system which results from different combination between electrical machines and power converters. Various techniques of energy storage were, also described in this part. The second chapter was devoted for technique of optimization (conventionally methods, gradient method and fuzzy logic method) and limitation of power (active Stall, passive Stall, Pitch control and limitation by electrical control of generator). The third chapter illustrates the dynamic behavior of wind turbine system connected to the electrical grid and his control. Two case of optimization and limitation of power were considered. In the first time, optimization was achieved by conventional method and limitation of power by Pitch control based on fuzzy logic algorithm. In the second time, optimization of power was achieved by fuzzy logic algorithm and his limitation by electrical control of generator. The last chapter concern autonomous case of low power wind energy conversion system. The system includes the diode rectifier, the DC chopper and the battery storage element. The optimization and limitation of power were achieved by the control of the DC chopper (MPPT on the DC-side) with current battery regulation.

Key Words: *variable speed wind turbine, PMSG, MPPT, optimization technique, grid connection, Autonomous operation*