

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



**THESE**

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT LMD**

**Spécialité: Commande et Actionneurs Electriques**

Présenté par

**BENKAHLA Mohamed**

Thème

---

**Etude et contrôle d'un système de production  
d'énergie électrique renouvelable autonome  
(énergie éolienne, photovoltaïque et diesel)**

---

Soutenue le 11/07/2021, devant le jury composé de:

ZEGAOUI Abdellah	MCA	Université de Chlef	Président
TALEB Rachid	Professeur	Université de Chlef	Rapporteur
BOUDJEMA Zinelaabidine	MCA	Université de Chlef	Co-rapporteur
MELIANI Bouziane	MCA	Université de Relizane	Examineur
BOUNADJA Elhadj	MCA	Université de Chlef	Examineur

---

---

# **Avant-propos**

---

---

# Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse de Doctorat ont été effectués au Laboratoire Génie Electrique et Energies Renouvelables (LGEER), de l'université de Hassiba Ben Bouali de CHLEF (UHBC). Sous la direction de Professeur **Rachide TALEB**, et le Maître de conférences **Zinelaabidine BOUDJEMA**.

D'abord, je dois exprimer ma gratitude et mes profonds remerciements à Monsieur **Rachide TALEB**, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de diriger mon travail, pour sa rigueur scientifique et ses qualités humaines. Ses conseils et ses critiques ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier aussi à **Zinelaabidine BOUDJEMA**, pour sa collaboration, pour toutes les compétences techniques partagées, ainsi que pour son amitié.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur **Abdellah ZEGAOUI**, Maître de conférences à l'université de Hassiba Ben Bouali de CHLEF (UHBC), pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ma thèse.

Je remercie profondément Monsieur **Bouziane MELIANI**, Maître de conférences à l'université de Relizane, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de participer à mon jury.

Egalement, je tiens à remercier vivement monsieur **El Hadj BOUNADJA**, Maître de conférences à l'université de Hassiba Ben Bouali de CHLEF (UHBC), pour sa gentillesse et d'avoir accepté de juger et d'évaluer mon travail.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues enseignants du département de l'électrotechnique de l'UHBC de Chlef. Mes sincères remerciements vont aussi aux personnes qui m'ont aidé en contribuant, de près ou de loin, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous ceux que j'aurais pu omettre de citer et qui de près ou de loin m'ont aidé et soutenu.

Je ne peux terminer sans avoir une pensée pour mes parents, ma petite famille, frères et sœurs. Ils m'ont toujours soutenu et encouragé.

# Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma mère, à ma mère, à ma mère,

A mon père, A mon père, A mon père,

Ma grand-mère, Ma grand-mère, Ma grand-mère

Ma femme, ma femme, ma femme

A mes chers petits enfants « Yaakoub » et « Anes »

A mes frères et ma sœur

A toute la famille Benkahla

A mes amis et collègues

A tous mes enseignants et enseignantes depuis de primaire

---

---

# **Table des matières**

---

---

# TABLE DES MATIERES

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I :      <i>Etat de l'art des systèmes d'énergies renouvelables</i></b>	
I.1. Introduction .....	8
I.2. Génération d'énergie renouvelable .....	9
I.3. Les différents types énergies renouvelables .....	10
I.3.1 Production éolienne .....	10
I.3.2. Énergie solaire .....	11
I.3.2.1. Thermo solaire .....	11
I.3.2.2. L'énergie solaire photovoltaïque .....	13
I.3.3. L'énergie Hydraulique .....	14
I.3.4. L'énergie Géothermie .....	15
I.3.5. L'énergie biomasse .....	16
I.3.6. Energie de la mer .....	18
I.4. Production des énergies renouvelables .....	19
I.4.1. Production dans le monde .....	19
I.4.2. Les énergies renouvelables en Algérie .....	21
I.4.3. Situation des énergies renouvelables en Algérie .....	21
I.6. Avantage des énergies renouvelables .....	23
I.7. Inconvénients des énergies renouvelables .....	23
I.8. Systèmes de stockage pour la production d'électricité .....	23
I.9. Energie renouvelable et systèmes de stockage .....	24
I.10. Conclusion .....	25
<b>Chapitre II :      <i>Modélisation et commande de la turbine éolienne</i></b>	
II.1. Introduction .....	26
II.2. Aperçu Sur L'énergie Eolienne .....	26
II.2.1. Historique .....	26
II.2.2. Définition de l'énergie éolienne .....	28
II.3. Différentes technologies des éoliennes .....	29
II.3.1. Aéroturbines à axe vertical (VAWT) .....	30
II.3.1.1. Eoliennes à rotor de Darrieus .....	30

II.3.1.2. Eoliennes à rotor de Savonius .....	31
II.3.2. Turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT) .....	31
II.3.2.1. Les éoliennes à marche lente .....	32
II.3.2.2. Les éoliennes à marche rapide .....	32
II.3.3 Comparaison .....	33
II.4. Puissance des éoliennes .....	33
II.5. Principaux composants d'une éolienne .....	34
II.5.1. La tour ou le mât .....	34
II.5.2. Le rotor .....	34
II.5.3. La nacelle .....	34
II.6. État de l'art sur les génératrices d'éoliennes .....	36
II.6.1. Eolienne à vitesse fixe .....	36
II.6.2. Eolienne à vitesse variable .....	36
II.6.2.1. Eolienne isolée (autonome) .....	37
II.6.2.2. Eolienne connecté au réseau .....	38
II.7. Aperçu Sur Les Systèmes De Conversion Electromécanique .....	39
II.7.1 Système Utilisant Une Génératrice Synchrone .....	39
II.7.1.1. Exploitation dans l'éolien .....	39
II.7.1.2. Avantages et inconvénients .....	40
II.7.2 Systèmes Utilisant La Machine Asynchrone .....	41
II.7.2.1. Exploitation dans l'éolien .....	41
II.7.2.2. Avantages et inconvénients .....	41
II.7.3. Systèmes Utilisant la machine asynchrone à double alimentation .....	42
II.7.3.1. Exploitation dans l'éolien .....	42
II.7.3.2. Avantages et inconvénients .....	42
II.8. Modélisation mathématique de la turbine éolienne .....	43
II.8.1. Hypothèses simplificatrices .....	43
II.8.2. Modèle aérodynamique .....	43
II.8.3. Modèle du multiplicateur de vitesse .....	45
II.8.4. Modèle de la partie mécanique .....	45
II.9. Stratégie de commande de la turbine éolienne .....	47
II.9.1. Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance .....	47
II.9.2. Calcul du couple de référence .....	49

II.9.3. Commande de la vitesse de la turbine sans mesure de vitesse du vent .....	49
II.9.4. Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation .....	51
II.10. Résultats de simulation .....	53
II.11. Conclusion .....	55

### **Chapitre III : Commande vectorielle de la GADA**

III.1. Introduction .....	56
III.2. Notions sur machine asynchrone à double alimentation .....	56
III.2.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ...	56
III.2.2. Fonctionnement de la GADA dans un système éolien .....	57
III.2.3. Modes de fonctionnement de la MADA .....	58
III.2.4. Intérêt de la MADA .....	60
III.3. Etat de l'Art sur les éoliennes à base d'une machine asynchrone à double alimentation .....	60
III.3.1. Différentes structures d'un système éolien à base d'une MADA .....	60
III.3.1.1. Applications moteur .....	60
III.3.1.1.1. MADA simple .....	61
III.3.1.1.2. MADA à rotor alimenté par un Cycloconvertisseur .....	61
III.3.1.1.3. MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants ...	62
III.3.1.2. Applications génératrice .....	62
III.3.1.2.1. MADA à énergie rotorique dissipée .....	63
III.3.1.2.2. Structure de Kramer .....	63
III.3.1.2.3. MADA à structure de Scherbius (cycloconvertisseur) .....	64
III.3.1.2.4. MADA à structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	65
III.3.2. Choix de convertisseurs pour les éoliennes à base de la MADA .....	67
III.4. Avantages et inconvénients de la MADA .....	67
III.4.1. Avantages de la MADA .....	67
III.4.2. Inconvénients de la MADA .....	68
III.5. Modélisation de la GADA .....	69
III.5.1. Hypothèses simplificatrices .....	69
III.5.2. Modèle triphasé de la MADA .....	70
III.5.2.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé .....	70
III.5.2.2. Les équations électriques .....	71
III.5.2.3. Les relations flux – courants (relations électromagnétiques) .....	72

III.5.3. La transformation de Park .....	72
III.5.3.1. Définition .....	72
III.5.3.2. Choix de référentiel de Park .....	74
III.5.4. Modèle diphasé de la MADA .....	74
III.5.4.1. Equations électriques .....	74
III.5.4.2. Relations flux – courants .....	75
III.5.4.3. Equation mécanique .....	75
III.5.4.4. Le couple électromagnétique .....	75
III.5.4.5. Puissances statoriques .....	76
III.5.5. Modèle d'état de Park de la MADA .....	76
III.6. Modélisation des convertisseurs de puissance .....	77
III.6.1. Description des composants du système d'alimentation de la GADA .....	77
III.6.2. Convertisseur côté réseau (CCR) .....	78
III.6.2.1. Modèle du bus continu .....	79
III.6.2.2. Modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park .....	79
III.6.3. Convertisseur côté génératrice (CCG) .....	79
III.7. Stratégie de commande de la GADA .....	80
III.7.1. Méthode directe .....	84
III.7.2. Méthode indirecte .....	84
III.8. Synthèse des régulateurs PI .....	85
III.9. Résultats de simulation d'un régulateur PI .....	85
III.9.1. Test de suivi de consigne .....	85
III.9.2. Sensibilité aux perturbations .....	88
III.9.3. Test de robustesse .....	89
III.10. Conclusion .....	91

#### ***Chapitre IV : Commande par mode glissant flou adaptatif de la GADA***

IV.1. Introduction .....	92
IV.2. Modèle de l'onduleur de tension un onduleur multiniveau .....	93
IV.2.1. Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux .....	93
IV.2.2. Onduleur multiniveau asymétrique à pas uniforme .....	94
IV.2.3. Stratégies de commande .....	96
IV.3. Commande par mode glissant : concepts de base .....	98
IV.3.1. Systèmes à structures variables .....	98

IV.3.2. Théorie des modes glissants .....	98
IV.3.3. Les modes de la trajectoire dans le plan de phase .....	99
IV.4. Généralités sur la théorie du contrôle par mode glissant .....	100
IV.4.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande .....	101
IV.4.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état .....	101
IV.4.3. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente .....	102
IV.5. Conception de la commande par mode de glissement .....	102
IV.5.1. Choix de la surface de glissement .....	103
IV.5.2. Conditions de convergence .....	104
IV.5.2.1. Fonction directe de commutation .....	104
IV.5.2.2. Fonction de Lyapunov .....	105
IV.5.3. Détermination de la loi de commande .....	105
IV.5.3.1. Définition des grandeurs de commande .....	106
IV.5.3.2. Expression analytique de la commande .....	107
IV.6. Phénomène de broutement " Chattering " .....	108
IV.7. Domaine d'application du réglage par mode de glissement .....	111
IV.8. Notes sur l'application du mode glissant à la machine asynchrone à double alimentation .....	111
IV.9. Application du réglage par mode de glissement pour la régulation des puissances statorique active et réactive de la GADA .....	112
IV.9.1. Contrôle des puissances active et réactive .....	112
IV.9.2. Détermination des paramètres $K_p$ et $K_Q$ .....	114
IV.10. Le contrôleur de la mode glissant adaptatif .....	116
IV.11. Contrôleur de la mode glissant flou adaptatif .....	117
IV.12. Résultats de simulation et discussions .....	120
IV.12.1. Simulation du contrôle des puissances statoriques de la GADA .....	121
IV.12.1.1. Suivi des consignes de régulation .....	121
IV.12.1.2. Sensibilité aux perturbations .....	125
IV.12.1.3. Robustesse .....	126
IV.13. Conclusion .....	128

**Chapitre V :      Etude et commande d'un système d'énergie hybride  
   éolien/photovoltaïque/diesel**

V.1. Introduction .....	129
V.2. Caractérisation et tache des systèmes hybrides .....	129
V.2.1. Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides .....	129
V.2.2. Classification des systèmes hybrides .....	130
V.2.2.1. Régime du fonctionnement .....	131
V.2.2.2. La structure du système hybride .....	131
V.2.2.3. Gamme de la puissance .....	132
V.3. Architecture Des Systèmes Hybrides .....	132
V.3. 1. Architecture à bus CC .....	133
V.3. 2. Architecture mixte à bus CC / CA .....	134
V.3. 3. Architecture à bus CA .....	135
V.4. Composants d'un système hybride .....	136
V.5. Description des composants du système hybride .....	137
V.5.1. Le générateur photovoltaïque .....	137
V.5.1.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	137
V.5.1.2. Le dopage des semi-conducteurs .....	138
V.5.1.2.1. Polarisation de la jonction PN .....	139
V.5.1.2. 2. Jonction PN sous éclairnement .....	139
V.5.1.3. Les différentes technologies .....	140
V.5.1.4. Modélisation d'un générateur photovoltaïque .....	142
V.5.1.5. Association des cellules photovoltaïques .....	145
V.5.1.5.1. Association en série .....	145
V.5.1.5.2. Association en parallèle .....	145
V.5.1.5.3. Association hybride (en série et en parallèle) .....	146
V.5.1.6. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) .....	147
V.5.1.7. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque .....	148
V.5.1.8. Caractéristique I(V) d'un panneau photovoltaïque .....	149
V.5.1.9. Influence des paramètres externes sur la caractéristique I (V) .....	149
V.5.1.9.1. Influence des résistances série et shunt .....	149
V.5.1.9.2. Influence de l'éclairnement .....	150
V.5.1.9.3. Influence de la température .....	151

V.5.1.10. Fonctionnement optimal du GPV .....	152
V.5.1.11. Recherche de point de puissance maximale MPPT .....	153
V.5.1.12. Rendement de la chaîne de puissance .....	153
V.5.1.13. Convertisseur survolteur (Boost converter) .....	154
V.5.1.13.1. Modèle mathématique équivalent .....	155
V.5.1.13.2. Le rapport de conversion .....	156
V.5.1.14. Stratégie de recherche du point de fonctionnement optimal .....	159
V.5.1.14.1. Classique avec un pas de perturbation fixe (PPF) .....	159
V.5.1.14.2. Classique avec un pas de perturbation variable (PPV) .....	164
V.5.1.14.3. Elimination de déviation du mode de recherche de MPPT.	166
V.5.2. Le générateur diesel .....	171
V.5.2.1. Modèle simplifié de la machine synchrone .....	174
V.5.2.2. Système embrayage .....	175
V.5.2.3. Simulation du groupe électrogène .....	176
V.5.3. Systèmes de stockage .....	177
V.5.3.1. Technologies des systèmes de stockage .....	179
V.5.3.2. Caractéristiques des batteries .....	181
V.5.4. Le régulateur de charge batteries .....	182
V.5.5. Convertisseurs .....	182
V.5.6. Le système de supervision .....	183
V.5.7. Les charge .....	184
V.6. Modélisation chaîne de stockage .....	184
V.6.1. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel .....	184
V.6.2. Commande du système de stockage .....	185
V.6.3. Mode de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel .....	186
V.6.3.1. Mode charge .....	186
V.6.3.2. Mode décharge .....	186
V.7. Architecture de l'installation étudiée .....	187
V.7.1. Principe de fonctionnement .....	188
V.7.2. Le rôle de stockage dans une installation hybride PV/Diesel .....	189
V.7.3. Modélisation du système de stockage .....	189
V.8. Scénario stratégie de supervision et gestion d'énergie .....	189
V.9. Résultats de simulation et discussion .....	193

V.9. 1. Scénarios 1 : Profil de charge variable et condition climatique fixe .....	193
V.9. 2. Scénarios 2: Profil de charge variable et condition climatique variable	198
V.10. Conclusion .....	204
<b>Conclusion générale</b> .....	205
<b>Annexes</b>	
A. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique .....	208
A.1. Loi de Betz .....	208
A.2. Production d'énergie mécanique .....	209
B. Réglage de vitesse par régulateur de type PI classique .....	210
C. Synthèse du régulateur PI .....	212
D. La logique Floue .....	214
D.1. Principe et définition .....	214
D.2. Théorie des sous-ensembles flous et logique floue .....	214
D.2.1. Théorie des sous-ensembles flous .....	214
D.2.2. Variable linguistique .....	215
D.2.3. Opérations sur les ensembles flous .....	216
D.2.3.1. Union (disjonction) .....	216
D.2.3.2. Intersection (conjonction) .....	216
D.2.3.3. Complémentation .....	216
D.2.3.4. Produit cartésien .....	217
D.2.3.5. Egalité .....	217
D.2.3.6. Inclusion .....	217
D.2.3.7. Relation floue .....	217
D.2.4. Fonction d'appartenance .....	217
D.2.5. Propositions floues .....	219
D.2.5.1. Proposition floues élémentaires .....	219
D.2.5.2. Proposition floues générales .....	219
D.2.6. Raisonnement en logique floue .....	219
D.2.6.1. Implication floue .....	219
D.2.6.2. Inférence floue .....	220
E. Paramètres de la chaîne de conversion éolienne basée sur une GADA .....	223
F.1. Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé dans les conditions climatiques standards .....	224
F.2. Schémas bloc de MPPT P&O (PPF) modifiée .....	224
G.1. Groupe électrogène diesel industriel – K12 50 Hz .....	225
<b>Références bibliographiques</b> .....	226

---

---

# **Listes des figures et tableaux**

---

---

**CHAPITRE I :**

Figure I.1 : Différents types d'énergies renouvelables .....	10
Figure I.2 : Développement de l'énergie éolienne mondiale .....	11
Figure I.3 : Schéma de principe d'une centrale gravitaire .....	14
Figure I.4 : Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique .....	16
Figure I.5 : Production de l'électricité géothermie par pays .....	16
Figure I.6 : Énergie Biomasse .....	17
Figure I .7 : Production mondiale d'électricité biomasse bioénergie (par pays et par région), 2005–2015 .....	18
Figure I.8 : Capacité de production renouvelable par source d'énergie .....	21
Figure I.9 : Production nationale des énergies renouvelables en TWh .....	22
Figure I.10 : Installation du parc de la production nationale en MW .....	22

**CHAPITRE II :**

Figure II.1 : Le célèbre dessin des moulins à vent hollandais .....	27
Figure II.2 : Les premiers turbinent à axe horizontal et vertical .....	27
Figure II.3: Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur .....	28
Figure II.4 : Evolution de la puissance du parc éolien mondial .....	29
Figure II.5 : Eolienne à axe vertical (Structure de Darrieus) .....	30
Figure II.6 : Eolienne à axe vertical (Structure de Savonius) .....	31
Figure II.7 : Turbines à axe Horizontal .....	31
Figure II.8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes .....	32
Figure II.9 : Principaux composants de l'éolienne moderne .....	34
Figure II.10 : Vitesse fixe .....	36
Figure II.11 : Vitesse variable .....	37
Figure II.12 : Eolienne isolée à base de la MADA .....	38
Figure II.13 : Eolienne installée en mer .....	38
Figure II.14 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne .....	40
Figure II.15 : machine asynchrone brushless connecté au réseau .....	41
Figure II.16 : Eolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) .....	42
Figure II.17 : Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	43
Figure II.18 : Modèle mécanique simplifié de la turbine .....	45

Figure II.19: Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne .....	47
Figure II.20 : Caractéristique puissance vitesse .....	47
Figure II.21 : Courbe caractéristique retenue de $C_p$ pour notre étude .....	48
Figure II.22 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse .....	51
Figure II.23 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse .....	53
Figure II. 24 : Profil du vent appliqué .....	53
Figure II. 25 : Résultats de la commande MPPT avec asservissement de vitesse par PI classique .....	54
Figure II. 26 : Résultats de la commande MPPT avec asservissement de vitesse par MG ...	55
Figure II.27 : Les résultats du MPPT obtenus avec les deux stratégies .....	55

### **CHAPITRE III :**

Figure III.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA .....	57
Figure III.2: Schéma synoptique du modèle et d'une commande de la chaine de conversion étudiée .....	57
Figure III.3 : Modes de fonctionnement de la MADA .....	59
Figure III.4 : Configuration d'une MADA simple .....	61
Figure III.5 : MADA avec rotor alimenté par un cyclo-convertisseur .....	61
Figure III.6 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cyclo-convertisseurs ....	62
Figure III.7 : MADA à énergie rotorique dissipée .....	63
Figure III.8 : MADA à structure de Kramer .....	64
Figure III.9 : MADA à structure Scherbius .....	65
Figure III.10 : MADA à structure de Scherbius avec convertisseurs MLI .....	66
Figure III.11 : Représentation électrique des enroulements de la MADA dans le system triphasée .....	70
Figure III.12 : Repérage angulaire du système d'axes ( $d - q$ ) associé au stator de la MADA.	73
Figure III.13 : Repérage angulaire du système d'axes ( $d - q$ ) associé au rotor de la MADA.	73
Figure III.14 : Composants du système d'alimentation de la GADA .....	78
Figure III.15 : Connexion du CCR au réseau électrique .....	78
Figure III.16 : Connexion du CCG au rotor de la GADA .....	80
Figure III.17 : Schéma bloc de la GADA .....	83
Figure III.18 : Schéma bloc de la commande directe de la GADA .....	84

Figure III.19 : Schéma bloc de la commande indirecte de la GADA .....	84
Figure III.20 : Profils de références des puissances active et réactive imposées dans les simulations .....	85
Figure III.21 : Commande en puissances de la GADA par la méthode directe (test de suivi de consigne) .....	86
Figure III.22 : Commande en puissances de la GADA par la méthode indirecte (test de suivi de consigne) .....	88
Figure III.23 : Profil de la vitesse de rotation imposée de la GADA (en bleu) .....	88
Figure III.24 : Effet de variation de la vitesse de rotation sur la commande en puissances de la GADA .....	89
Figure III.25 : Commande en puissances de la GADA par la méthode directe (test de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques) .....	90
Figure III.26 : Commande en puissances de la GADA par la méthode indirecte (test de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques).....	90
Figure III.27 : Comparaison des écarts sur les puissances active et réactive des deux méthodes de commande de la GADA (test de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques) .....	91

## **CHAPITRE IV :**

Figure IV.1: Mise en série de $k$ onduleurs monophasés par phase .....	94
Figure IV 2: Exemple de forme d'onde d'un onduleur multiniveau .....	94
Figure IV 3: Tensions partielles et tension de phase d'un onduleur asymétrique à 19 niveaux avec $u_{d1} = 1$ , $u_{d2} = 3$ et $u_{d3} = 5$ .....	97
Figure IV.4 : Trajectoires de $f^+$ et de $f^-$ pour le mode de glissement .....	99
Figure IV.5 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase .....	100
Figure IV.6 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande	101
Figure IV.7 : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état	101
Figure IV.8 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente .....	102
Figure IV.9 : Linéarisation exacte de l'écart .....	104
Figure IV.10 : Commande appliquée aux systèmes à structure variable .....	106
Figure IV.11 : Représentation de la fonction "sign" .....	108
Figure IV.12 : Représentation de la commande douce à un seuil .....	110
Figure IV.13 : Représentation de la commande douce à deux seuils .....	110
Figure IV.14 : Représentation de fonction Smooth .....	110

Figure IV.15 : Schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA .....	115
Figure IV.16 : Diagramme du Bloc du contrôle de la mode glissant adaptatif (ASMC)..	116
Figure IV.17 : Structure d'un système flou .....	118
Figure IV.18 : Schéma de principe d'un contrôleur flou .....	118
Figure IV.19 : Fonctions d'appartenance des différentes variables linguistiques .....	119
Figure IV.20 : Diagramme du Bloc du Contrôle de la Mode Glissant Flou Adaptatif (AFSMC).	120
Figure IV.21 : Commande par mode glissant en puissances de la GADA (Test de suivi de consignes) .....	122
Figure IV.22 : Commande par mode glissant adaptatif en puissances de la GADA (Test de suivi de consignes) .....	123
Figure IV.23 : Commande par mode glissant flou adaptatif en puissances de la GADA (Test de suivi de consignes) .....	124
Figure IV.24 : Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique pour : (a) : SMC, (b) : ASMC et (c) : AFSMC utilisée inverter conventionnel. (d) : AFSMC inverter USAMI à 19 niveaux .....	125
Figure IV.25 : Effet de variation de la vitesse de rotation sur la commande en puissances de la GADA .....	126
Figure IV.26 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande PI indirecte de la GADA (avant et après les variations paramétriques) .....	126
Figure IV.27 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant de la GADA (avant et après les variations paramétriques) .....	127
Figure IV.28 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant adaptatif de la GADA (avant et après les variations paramétriques) .....	127
Figure IV.29 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant flou adaptatif de la GADA (avant et après les variations paramétriques) .....	127
Figure IV.30 : Comparaison des écarts sur les puissances actives et réactives des trois méthodes de commande par mode glissant (PI, SMC, ASMC et AFSMC) de la GADA (test de robustesse) .....	128

## **CHAPITRE V :**

Figure V.1 : Schéma général du système d'énergie hybride .....	130
Figure V.2 : Classification des systèmes hybrides .....	132
Figure V.3 : Configuration d'un SH à bus à Courant Continu (CC) .....	133
Figure VI.4 : Configuration du SH à deux bus à CC et à CA .....	134

Figure V.5 : Configuration du SH à bus CA .....	136
Figure V.6: Cellule électrochimique de base .....	137
Figure V.7 : Phénomène de conduction dans les matériaux semi-conducteurs .....	138
Figure V.8 : Dopage de type N et dopage de type P .....	138
Figure V.9 : Caractéristique d'une jonction PN polarisée .....	139
Figure V.10 : Caractéristique d'une jonction PN sous éclairage .....	140
Figure V.11 : Caractéristique $I_p(V_p)$ d'une cellule photovoltaïque idéale .....	140
Figure V.12 : Différentes technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque .....	141
Figure V.13 : Classification des différents semi-conducteurs utilisés dans les cellules PV ...	141
Figure V.14 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire (modèle à une exponentielle).	142
Figure V.15 : Schéma équivalent d'une cellule solaire (modèle à double exponentielle).	143
Figure V.16 : Association en série de $n_s$ cellules PV identiques .....	145
Figure V.17 : Caractéristique $I(V)$ de l'association de $n_s$ cellules identiques en série .....	145
Figure V.18 : Association en parallèle de $n_p$ cellules PV identiques .....	146
Figure V.19 : Caractéristique courant-tension de l'association de $n_p$ cellules identiques en parallèle .....	146
Figure V.20 : Caractéristique courant-tension de l'association de $n_p$ cellules en parallèle $n_s$ cellules en série dont certaines sont occultées .....	147
Figure V.21 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque .....	147
Figure V.22 : Caractéristiques courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'un module photovoltaïque .....	148
Figure V.23 : Caractéristique courant-tension résultante d'un groupement en série et en parallèle des modules identiques .....	149
Figure V.24 : Influence de la résistance série sur les caractéristiques PV .....	149
Figure V.25 : Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques PV .....	150
Figure V.26 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV pour différentes valeurs d'éclairage et une température constante .....	151
Figure V.27 : Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module PV pour différentes valeurs de température et un éclairage constant .....	151
Figure V.28 : Caractéristique $I(V)$ pour une charge résistive variable .....	152
Figure V.29 : Connexion GPV-charge à travers un étage d'adaptation .....	153
Figure V.30 : Connexion GPV-charge à travers un convertisseur DC/DC .....	153
Figure V.31 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost .....	155

Figure V.32 : Diagramme lorsque l'interrupteur T1 est fermé et D1 est ouvert.....	155
Figure V.33 : Diagramme lorsque l'interrupteur T1 est éteint et D1 est allumé .....	156
Figure V.34 : Formes typiques d'onde du convertisseur boost .....	157
Figure V.35 : Principe de la MPPT avec la méthode PO .....	159
Figure V. 36 : L'algorithme de la méthode perturbation et observation P&O .....	160
Figure V.37 : Caractéristique I-V et P-V du module photovoltaïque .....	161
Figure V.38 : Figure V.15 Caractéristique I-V et P-V du module photovoltaïque 7.5KW ...	162
Figure V.39 : Puissance de la sortie photovoltaïque et de la sortie du convertisseur Boost pour G variable .....	163
Figure V.40 : Tension de la sortie photovoltaïque et de la sortie du convertisseur DC-DC pour G variable .....	163
Figure V.41 : courant de la sortie photovoltaïque et de la sortie du convertisseur DC-DC ...	164
Figure V.42 : Organigramme de la commande P&O(PPV) classique .....	165
Figure V.43 : Comparaison entre P&O(PPF) et P&O(PPV) dans des conditions climatiques changeantes .....	166
Figure V.44 : Diminution rapide de l'irradiation .....	167
Figure V.45 : Augmentation rapide de l'irradiation .....	167
Figure V.46 : Observation du changement de courant .....	168
Figure V.47 : Élimination de déviation du mode de recherche de MPP .....	169
Figure V.48 : Organigramme de P&O(PPF) modifiée .....	169
Figure V.49 : Comparaison entre P&O(PPF) classique et P&O(PPF) modifiée dans des conditions climatiques variables .....	170
Figure V.50 : Configuration du groupe électrogène .....	171
Figure V.51 : Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié .....	172
Figure V.52 : Modèle équivalent d'un enroulement .....	174
Figure V.53 : La charge .....	176
Figure V.54 : La puissance générée par le GD.....	176
Figure V.55 : La vitesse du moteur diesel .....	176
Figure V.56 : La fréquence du système .....	176
Figure V.57 : Les tensions de charge .....	177
Figure V.58 : Les courants de charge .....	177
Figure V.59: Cellule électrochimique de base .....	178

Figure V.60: Coûts ; durée de vie et rendement des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques .....	179
Figure V.61 : Classification des technologies de système de stockage .....	180
Figure V.62 : Système de supervision .....	183
Figure V.63 : Schéma du système de stockage .....	184
Figure V.64 : Schéma électrique du convertisseur DC/DC bidirectionnel .....	185
Figure V.65 : Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel .....	186
Figure V.66 : Architecture du système étudié .....	187
Figure V.67 : Organigramme de l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie photovoltaïque- éolienne-batteries-diesel .....	191
Figure V.68 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien et puissance de charge .....	193
Figure V.69 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien et signaux de commande des interrupteurs .....	194
Figure V.70 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie .....	195
Figure V.71 : Comportement des batteries et signaux de commande des interrupteurs ...	196
Figure V.72 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie-Diesel ..	196
Figure V.73 : L'état On/Off du diesel et signaux de commande des interrupteurs .....	197
Figure V.74 : Puissance électrique produite par le système PV et par éolien .....	198
Figure V.75 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien .....	198
Figure V.76 : Comportement des batteries et signaux de commande des interrupteurs	200
Figure IV.77 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie .....	200
Figure V.78 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie-Diesel	200
Figure V.79 : L'état On/Off du diesel et signaux de commande des interrupteurs .....	201
Figure V.80 : Comportement des batteries et signaux de commande des interrupteurs ...	202
Figure V.81 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie-Diesel	202
Figure V.82 : L'état On/Off du diesel et signaux de commande des interrupteurs .....	203
Figure V.83 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie-Diesel ..	204

## **ANNEXE A:**

Figure A.1 : Tube de courant autour d'une éolienne .....	208
Figure A.2 : Coefficient de puissance .....	209
Figure A.3 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné .....	210

**ANNEXE B:**

Figure B.1 : Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation .....	211
--	-----

**ANNEXE C:**

Figure C.1 : Système régulé par un PI .....	212
---	-----

**ANNEXE D:**

Figure B.1 : Exemple de fonction d'appartenance ; (a) Logique classique, (b) Logique Floue	215
--	-----

Figure B.2 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance .....	218
---	-----

**ANNEXE F:**

Figure C.1 : Figure F.1 : Schémas bloc de la méthode P&O(PPF) modifiée .....	225
--	-----

**LISTE DES TABLEAUX****CHAPITRE II :**

Tableau II.1 : Comparaison des éoliennes a axe horizontales et a axe vertical .....	33
---	----

Tableau II.2 : Différents catégories des éoliennes .....	33
--	----

Tableau II.3 : illustre un comparatif simple entre les deux types de fonctionnement .....	39
---	----

Tableau II.4 : résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices synchrones	40
---	----

Tableau II.5 : Avantages et inconvénients des génératrices Asynchrones .....	41
--	----

Tableau II.6 : Avantages et inconvénients de la génératrice asynchrone double alimentation	42
--	----

**CHAPITRE III :**

Tableau III.1 : Quadrants de fonctionnement de la MADA .....	58
--	----

Tableau III.2 : Interrupteurs utilisés dans les convertisseurs .....	66
--	----

**CHAPITRE IV :**

Tableau 1: Exemples de possibilités de solutions redondantes .....	96
--	----

**CHAPITRE V :**

Tableau V.1: Classification des SH par gamme de puissance .....	132
---	-----

Tableau V.2: Valeurs de la fiche technique du module PV SPR-305E-WHT-D à STC .....	160
--	-----

Tableau V.3: Caractéristiques du photovoltaïque de 7.5 KW.....	161
--	-----

Tableau V.4: Valeurs des paramètres du module photovoltaïque 7.5 KW .....	161
---	-----

Tableau V.5: Paramètres du le hacheur boost .....	162
---	-----

Tableau V.2 : Fonctionnement du convertisseur bidirectionnel pour les différents modes ...	186
Tableau V.3 : La commande des interrupteurs .....	192

**ANNEXE B :**

Tableau B.1 : Conditions d'utilisation de Modus Ponens généralisé .....	220
Tableau B.2 : Conditions d'utilisation de Modus Tollen généralisé .....	221
Tableau B.3 : Les règles sous forme symbolique .....	221

**ANNEXE E :**

Tableau E.1 : Paramètres de l'éolienne de 7.5 KW .....	223
--	-----

**ANNEXE F :**

Tableau F.1 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque .....	224
--	-----

---

---

# **Symboles et Notations**

---

---

# GLOSSAIRE

## 1. EN FRANÇAIS

<b>GADA</b>	<b>G</b> énératrice <b>A</b> synchrone à <b>D</b> ouble <b>A</b> limentation
<b>MAS</b>	<b>M</b> achine <b>A</b> synchrone
<b>MS</b>	<b>M</b> achine <b>S</b> ynchrone
<b>MCC</b>	<b>M</b> achine à <b>C</b> ourant <b>C</b> ontinu
<b>f.e.m</b>	<b>F</b> orce électromotrice
<b>VAWT</b>	<b>V</b> ertical <b>A</b> xis <b>W</b> ind <b>T</b> urbine
<b>HAWT</b>	<b>H</b> orizontal <b>A</b> xis <b>W</b> ind <b>T</b> urbine
<b>CCG</b>	<b>C</b> onvertisseur <b>C</b> oté <b>G</b> énératrice
<b>CCR</b>	<b>C</b> onvertisseur <b>C</b> oté <b>R</b> éseau (ou <b>R</b> écepteur)
<b>MLI</b>	<b>M</b> odulation de <b>L</b> argeur d' <b>I</b> mpulsion
<b>CSV</b>	<b>C</b> ommande à <b>S</b> tructure <b>V</b> ariable
<b>PI</b>	<b>P</b> roportionnel <b>I</b> ntégral
<b>PV</b>	<b>P</b> hotovoltaïque
<b>GPV</b>	<b>G</b> énérateur <b>P</b> hotovoltaïque
<b>AG</b>	<b>A</b> lgorithme <b>G</b> énétique
<b>SEH</b>	<b>S</b> ystème d'énergie <b>h</b> ybride

## 2. EN ANGLAIS

<b>GWEC</b>	<b>G</b> lobal <b>W</b> ind <b>E</b> nergy <b>C</b> ouncil
<b>DFIG</b>	<b>D</b> oubly <b>F</b> ed <b>I</b> nduction <b>G</b> enerator
<b>AC</b>	<b>A</b> lternating <b>C</b> urrent
<b>DC</b>	<b>D</b> irect <b>C</b> urrent
<b>IGBT</b>	<b>I</b> nsulated <b>G</b> ate <b>B</b> ipolar <b>T</b> ransistor
<b>GTO</b>	<b>G</b> ate <b>T</b> urn- <b>O</b> ff <b>T</b> hystistor
<b>PWM</b>	<b>P</b> ulse <b>W</b> idth <b>M</b> odulation
<b>MPPT</b>	<b>M</b> aximum <b>P</b> ower <b>P</b> oint <b>T</b> racking
<b>FLC</b>	<b>F</b> uzzy <b>L</b> ogic <b>C</b> ontroller
<b>SMC</b>	<b>S</b> liding <b>M</b> ode <b>C</b> ontrol
<b>ASMC</b>	<b>A</b> daptive <b>S</b> liding <b>M</b> ode <b>C</b> ontrol
<b>AFSMC</b>	<b>A</b> daptive <b>F</b> uzzy <b>S</b> liding <b>M</b> ode <b>C</b> ontrol

## NOTATIONS

Liste non-exhaustive des principaux paramètres et variables.

- **Symboles spécifiques à la turbine :**

$V_v$	(m/s)	Vitesse du vent
$m$	(Kg)	Masse de l'air,
$P_{aer}$	(W)	Puissance aérodynamique de la turbine,
$P_v$	(W)	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé,
$\rho$	(Kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C),
$S$	(m <sup>2</sup> )	Surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi.R^2$ ,
$C_p$	(-)	Coefficient de puissance,
$C_{pmax}$	(-)	Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance,
$\Omega_t$	(rad/s)	Vitesse mécanique de la turbine,
$\Omega_g$	(rad/s)	Vitesse mécanique de la génératrice,
$\Omega_t^*$	(rad/s)	Vitesse de référence de la turbine,
$\Omega_g^*$	(rad/s)	Vitesse de référence de la génératrice,
$R$	(m)	Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne),
$G$	(-)	Gain du multiplicateur,
$\lambda$	(-)	Vitesse relative,
$\lambda_{opt}$	(-)	Vitesse relative optimale,
$\beta$	(deg)	Angle de calage des pales,
$C_g$	(N.m)	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice,
$C_t$	(N.m)	Couple mécanique disponible sur l'arbre lent de la turbine,
$C_{em}$	(N.m)	Couple électromagnétique de la génératrice,
$C_{em}^*$	(N.m)	Couple électromagnétique de référence,
$J_t$	(Kg.m <sup>2</sup> )	Moment d'inertie de la turbine,
$J_g$	(Kg.m <sup>2</sup> )	Moment d'inertie de la génératrice,
$J$	(Kg.m <sup>2</sup> )	Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice »,
$f_v$	(N.m.s/rad)	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,
$R_\Omega$	(-)	Régulateur pour l'asservissement de la vitesse mécanique de l'éolienne (PI),

$K_{p\Omega}$	(-)	Composante proportionnelle du correcteur $R\Omega$ (Boucle vitesse MPPT),
$K_{i\Omega}$	(-)	Composante intégrale du correcteur $R\Omega$ (Boucle vitesse MPPT).

• **Paramètres de modélisation de la GADA :**

$R_s$	( $\Omega$ )	Résistance statorique par phase,
$R_r$	( $\Omega$ )	Résistance rotorique par phase,
$L_s$	(H)	Inductance cyclique statorique par phase,
$L_r$	(H)	Inductance cyclique rotorique par phase,
$M$	(H)	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor),
$L_s$	(H)	Inductance propre d'une phase statorique,
$L_r$	(H)	Inductance de fuite rotorique par phase,
$\sigma$	(-)	Coefficient de dispersion ou (de Blondel),
$p$	(-)	Nombre de paires de pôles,
$J$	( $\text{kg.m}^2$ )	Moment d'inertie,
$f$	(N.m.s/rd)	Coefficient de frottement visqueux,
$C_{em}$	(N.m)	Couple électromagnétique,
$C_r$	(N.m)	Couple de charge,

• **Repères:**

$(s_a, s_b, s_c)$	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique,
$(r_a, r_b, r_c)$	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques,
$(d, q)$	Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme),
$(\alpha, \beta)$	Axes de référentiel de Concordia (repère de Park fixe au stator),
$\theta$ (rad)	Position angulaire du rotor par rapport au stator,
$\theta_s$ (rad)	Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d),
$\theta_r$ (rad)	Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d).

• **Grandeurs électriques au stator :**

$V_{s a, b, c}$	(V)	Tensions statoriques triphasées,
$V_{s d, q}$	(V)	Tensions statoriques diphasées dans le repère $(d, q)$ ,
$V_{s \alpha, \beta}$	(V)	Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$I_{s a, b, c}$	(A)	Courants statoriques triphasées,

$I_s d, q$	(A)	Courants statoriques diphasés dans le repère $(d, q)$ ,
$I_s \alpha, \beta$	(A)	Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$P_s$	(W)	Puissance active statorique,
$Q_s$	(W)	Puissance réactive statorique.

- **Grandeurs électriques au rotor :**

$\varphi_s a, b, c$	(Wb)	Vecteur de flux magnétiques au stator,
$\varphi_s \alpha, \beta$	(Wb)	Flux statoriques diphasés dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$\varphi_s d, q$	(Wb)	Flux statoriques diphasés dans le repère tournant $(d, q)$ .

- **Grandeurs magnétiques au rotor :**

$\varphi_r a, b, c$	(Wb)	Vecteur de flux magnétiques au rotor,
$\varphi_r \alpha, \beta$	(Wb)	Flux rotoriques diphasés dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$\varphi_r d, q$	(Wb)	Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant $(d, q)$ .

- **Grandeurs mécaniques :**

$\omega$	(rad/s)	Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation,
$\omega_n$	(rad/s)	Pulsation électrique correspondante à la vitesse nominale de rotation,
$\omega_s$	(rad/s)	Pulsation électrique des grandeurs statoriques,
$\omega_r$	(rad/s)	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques (Pulsation de glissement),
$g$	(-)	Glissement de la vitesse de rotation,
$f_s$	(Hz)	Fréquence électrique des grandeurs statoriques,
$f_r$	(Hz)	Fréquence électrique des grandeurs rotoriques,
$\Omega$	(rad/s)	Vitesse mécanique de rotation : $\Omega = \omega / p$ ,
$N$	(tr/min)	Vitesse mécanique de rotation : $N = 30 \Omega / \pi$ ,
$N_n$	(tr/min)	Vitesse mécanique nominale de rotation.

- **Transformations :**

$S$	Opérateur de Laplace,
$P$	Transformation de Park : $X_s a, b, c \rightarrow X_s d, q$ et $X_r a, b, c \rightarrow X_r d, q$ ,
$Co$	Transformation de Concordia : $X_s a, b, c \rightarrow X_s \alpha, \beta$ et $X_r a, b, c \rightarrow X_r \alpha, \beta$ ,

- **Grandeurs de commande de la GADA :**

$P_s^*$	(W)	Consigne de la puissance active statorique,
$Q_s^*$	(Var)	Consigne de la puissance réactive statorique,
$V_{dr}^*, V_{qr}^*$	(V)	Tensions rotoriques de référence dans le repère $(d, q)$ ,
$K_p, K_i$	(-)	Composantes proportionnelle et intégrale du correcteur PI,
$S(X)$	(-)	Surface de glissement d'une variable à réguler,
$S_1$	(W)	Surface de glissement de la puissance active statorique,
$S_2$	(Var)	Surface de glissement de la puissance réactive statorique,
$r$	(-)	Degré relatif de la surface de glissement,
$V_{qr}^n, V_{dr}^n$	(V)	Composantes normales des tensions rotoriques,
$V_{qr}^{eq}, V_{dr}^{eq}$	(V)	Composantes équivalentes des tensions rotoriques,
$K_i, l_i, \rho$	(-)	Gains de la commande par mode glissant d'ordre 2.

- **Symboles spécifiques au système photovoltaïque :**

$I_d$	(A)	Courant direct traversant une jonction PN,
$I_{sat}$	(A)	Courant de saturation,
$T$	(°K)	Température de jonction PN,
$A$	(-)	Facteur d'idéalité
$q$	(C)	Charge élémentaire de l'électron, égale à $1,602 \cdot 10^{-19}$ ,
$K$	(J/°K)	Constante de Boltzmann, égale à $1,381 \cdot 10^{-23}$ ,
$E$	(W/m <sup>2</sup> )	Eclairement,
$E_0$	(W/m <sup>2</sup> )	Eclairement de référence, égal à 1000,
$T$	(°K)	Température,
$T_0$	(°K)	Température de référence, égal à 298,
$I$	(A)	Courant délivré par la cellule PV,
$V$	(V)	Tension délivrée par la cellule PV,
$I_{ph}$	(A)	Courant photo-généré,
$I_{ph0}$	(A)	Courant photo-généré par la diode à 25 °C,
$I_s$	(A)	Courant de saturation de la diode dépendant de la température,
$I_s^0$	(A)	Courant de saturation de la diode à 25 °C,
$r_s$	(Ω)	Résistance série,

$r_{sh}$	( $\Omega$ )	Résistance shunt,
$r_{sh0}$	( $\Omega$ )	Résistance shunt de référence donné par le constructeur,
$E_g$	(eV)	Energie de gap du semi-conducteur,
$\alpha$	(–)	Constante liée à la nature du silicium utilisé,
$n_s$	(–)	Nombre de cellules photovoltaïque en série,
$n_p$	(–)	Nombre de cellules photovoltaïque en parallèle,
$V_{co}$	(V)	Tension du circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque,
$V_{sco}$	(V)	Tension de l'assemblage de $n_s$ cellule en série,
$I_{cc}$	(A)	Courant de court-circuit d'une cellule,
$I_{scc}$	(A)	Courant de court-circuit du regroupement de $n_s$ cellule en série,
$V_{pco}$	(V)	Tension de l'assemblage de $n_p$ cellule en parallèle,
$I_{pcc}$	(A)	Courant de court-circuit du regroupement de $n_p$ cellule en parallèle
$I_g$	(A)	Courant d'un générateur photovoltaïque,
$I_{ph}$	(A)	Courant photo-généré d'un générateur photovoltaïque,
$g$		
$I_{s, g}$	(A)	Courant de saturation d'un générateur photovoltaïque,
$V_g$	(V)	Tension d'un générateur photovoltaïque
$r_{s, g}$	( $\Omega$ )	Résistance série d'un générateur photovoltaïque,
$r_{sh, g}$	( $\Omega$ )	Résistance shunt d'un générateur photovoltaïque,
$g$		
$V_{opt}$	(V)	Tension optimale d'un générateur photovoltaïque,
$I^{opt}$	(A)	Courant optimal d'un générateur photovoltaïque,
$r_{opt}$	( $\Omega$ )	Résistance optimale d'un générateur photovoltaïque,
$P_{opt}$	(W)	Puissance optimale d'un générateur photovoltaïque,
$D$	(–)	Rapport cyclique d'un hacheur Buck-Boost.

---

---

# **Introduction Générale**

---

---

## ***Introduction Générale***

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas du tout nouveau; dans l'histoire de l'humanité, les énergies renouvelables ont été pendant longtemps la première possibilité de produire de l'énergie. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de cet humanité. Ceci a seulement changé avec la révolution industrielle. Qui apparaît à travers deux petits pics, l'un au cours du 19<sup>ème</sup> siècle avec le charbon et la découverte des machines à vapeur, l'autre au 20<sup>ème</sup> siècle avec le pétrole, le gaz et le nucléaire. Ce qui a diminué de l'application des énergies renouvelables en termes absolus et relatifs. Aujourd'hui, Une grande partie de l'énergie utilisée dans le monde (plus de 76%) provient de gisements de combustibles fossiles carbonés (charbon, pétrole, gaz). Ces gisements constitués au fil des âges sont évidemment en quantité limitée; ils sont épuisables et non renouvelables [1] [2]. Ils ont été et continuerons à être une cause importante de pollution et de changement de climat. Contrecoup l'émission des gaz à effet de serre est l'un des effets secondaires indésirables des énergies fossiles.

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé les risques de pénurie les matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, les gouvernements engagés dans le Protocole de Kyoto doivent donc multiplier leurs actions dans le secteur de la production d'énergie électrique afin de développer des sources d'Energies Renouvelables, propres et inépuisables, ces dernières représentent un gisement considérable au niveau mondial [3]. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici et au future, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables, pour cela plusieurs travaux de recherches ont été lancés dans plusieurs laboratoires de recherche dans le domaine de développement durable, pour but de satisfaire la demande de consommation énergétique d'une part et d'autre part pour réduire les effets négatives des ressources d'origine fossile sur l'environnement [4].

Les énergies renouvelables sont exploitées de différentes manières dans différentes régions du monde. Les gammes de ressources renouvelables utilisées comprennent la biomasse, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'hydroélectricité et l'énergie solaire. Chacune de ces technologies renouvelables a ses avantages et ses inconvénients. Les énergies hydroélectrique et géothermique sont spécifiques à l'emplacement de leurs énergies primaires, ce qui limite leur utilisation. Le développement de la biomasse a eu des implications sur la

production alimentaire, car pour produire cette énergie avec un meilleur rendement, il faut occuper des terres fertiles et par conséquent, baisser la production agricole et entraîner une importante déforestation. Les éoliennes nécessitent un entretien régulier en raison des pièces mobiles et ne sont pas considérées esthétiquement attrayantes. L'énergie solaire a aussi ses inconvénients. Cependant, les panneaux photovoltaïques (PV) nécessitent une maintenance minimale, ne génèrent aucun bruit et leur coût continu à diminuer au cours des prochaines années. Ces sources d'énergies, dites aussi productions dispersées, peuvent être raccordées soit au réseau électrique, soit alimenter un site isolé [5-6]. La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie éolienne associée au solaire photovoltaïque et diesel.

L'énergie éolienne est, parmi les énergies renouvelables qui connaissent une croissance très rapide. Elle est presque universellement reconnue comme la source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen termes. Cette énergie se développe à un rythme soutenu dans presque tous les pays du monde, avec une croissance de 30 % par an.

Le développement des éoliennes a conduit les scientifiques à mener des recherches dans le but de générer des grandes puissances, d'extraire le maximum de puissance d'un gisement éolien, et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite ; ceci est rendu possible grâce aux éoliennes de dernière génération fonctionnant à vitesse variable, qui utilisent souvent la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) [7]. Cette machine permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable, à travers la commande de son rotor ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse du vent. Parmi les avantages de cette machine, les convertisseurs statiques utilisés pour son contrôle peuvent être dimensionnés pour transiter seulement une partie de la puissance totale générée.

De nombreux travaux de recherche sur le contrôle et la commande d'éoliennes ont été menés. Grâce à ces travaux, les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation des puissances statoriques active et réactive [8]. Afin d'obtenir avec la machine asynchrone à double alimentation des performances semblables à celle de la machine à courant continu, il est nécessaire d'appliquer la commande vectorielle par orientation du flux afin d'assurer le contrôle du flux et celui du courant générant le couple électromagnétique. La commande vectorielle basée sur les correcteurs classiques ne permet plus d'avoir les qualités de réglage exigées. Le problème peut être résolu

par un contrôle adaptatif par lequel le contrôleur est forcé à s'adapter à des conditions de fonctionnement très variées ; en exploitant les informations fournies par le générateur en temps réel. Néanmoins ce type de contrôle reste difficile à implanter [9]. Pour cela, nous serons amené à utiliser de plus en plus les techniques de l'automatique avancée plus compétitives et aptes à surmonter les non linéarités des systèmes et plus adaptées à la résolution des problèmes de robustesse existants [10].

Ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet d'aboutir à des processus industriels de hautes performances. Chaque technique étant la meilleure pour une classe particulière de la commande pour une application donnée, dépendant de la forme des équations d'état du système et selon le but envisagé. Nous pouvons citer à titre d'exemple, la commande floue et la commande à structure variable (CSV) qui, dans la bibliographie du génie électrique, porte le nom de commande par mode glissant, en anglais "Sliding Mode Control". Ces deux types de commande sont réputés pour être des commandes robustes vis-à-vis les variations paramétriques. L'intérêt récent accordé à ces dernières est dû, essentiellement, à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants.

Les systèmes photovoltaïques présentent des caractéristiques fortement non linéaires, leur production d'énergie dépend des conditions climatiques qui sont hautement aléatoires. Tout cela rend la conception d'un système photovoltaïque optimisé difficile. Le développement des techniques performantes devient indispensable pour palier à ce problème. L'utilisation des techniques intelligentes connaît un grand essor actuellement dans les systèmes complexes et mal définis, que ce soit pour la modélisation, l'optimisation, l'identification ou la commande des systèmes; ceci grâce à leur adaptabilité face aux changements des paramètres des systèmes, et leur robustesse envers les perturbations et les erreurs de modélisation. Ceci les rend très adaptées pour être des solutions viables et performantes pour le problème de l'optimisation des systèmes photovoltaïques [11-12].

On distingue deux grands types d'applications susceptibles d'être alimentées par l'énergie photovoltaïque, à savoir : les systèmes de production autonomes pour l'alimentation des sites ou des équipements isolés et non raccordés au réseau électrique, les systèmes de production injectés au réseau de distribution de l'électricité.

La solution la plus étudiée pour améliorer la durabilité de l'infrastructure de production d'énergie dans les sites isolés est la mise en oeuvre des systèmes hybrides d'énergies renouvelables (SHER) décentralisés. Ces systèmes combinent deux ou plusieurs énergies renouvelables. L'objectif principal est d'exploiter les ressources renouvelables disponibles afin d'améliorer l'efficacité globale et la rentabilité du système en termes de coût et de disponibilité, sachant que le bilan « écologique », est supposé a priori favorable [6].

Certaines filières des énergies renouvelables, déjà mûres, peuvent fournir des composants fiables et économiquement rentables pour l'intégration dans les systèmes d'énergie électrique. Cependant, des améliorations dans la conception et le fonctionnement des SEH sont toujours nécessaires pour rendre plus compétitives ces filières technologiques et permettre leur essor.

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie dans un SEH doit avoir une incidence profitable sur la production d'énergie, en termes de coût et de disponibilité, étant entendu que le bilan écologique est supposé a priori favorable. Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable [13]. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Le but premier d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible rendre maximale, dans le bilan, la part d'énergie provenant des sources d'énergie renouvelable. Dans tous les cas, la bonne qualité de la puissance doit être garantie par rapport aux normes de sécurité des personnes et d'usage des équipements.

Dans ce contexte, le travail de recherche présenté dans cette thèse est une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelables dans un SEH.

#### ❖ **Objectifs de la thèse**

L'objectif de cette thèse est d'une part de développer une analyse approfondie des avantages que la technologie des systèmes hybrides pourrait apporter à la crise énergétique mondiale ; la

simulation d'un système hybride PV/éolien/diesel connecté au réseau et ensuite de rechercher une solution optimale d'un système d'énergie hybride (PV/éolien/batterie/diesel).

Nos objectifs principaux peuvent être résumés dans les points suivants :

- ✓ L'amélioration de la commande MPPT classique de la turbine éolienne par l'utilisation de la logique floue ;
- ✓ La conception d'une régulation directe et indirecte par orientation du flux statorique de la GADA, en l'intégrant dans un schéma de simulation dans l'environnement Matlab/Simulink ;
- ✓ La synthèse de plusieurs contrôleurs pour asservir les puissances active et réactive statorique de la GADA, en exploitant des approches différentes. Soit respectivement :
  - La technique linéaire classique basée sur les correcteurs PI ;
  - La technique non linéaire basée sur la régulation par mode glissant ;
  - La technique non linéaire basée sur la régulation par mode glissant Adaptatif ;
  - La technique non linéaire basée sur la combinaison entre le mode glissant flou adaptatif ;
  - La commande MPPT du générateur photovoltaïque ;
  - L'intégration des générateurs éolien et photovoltaïque, diesel dans un seul système hybride, associé à une unité de stockage d'énergie, dédié à l'alimentation en puissance d'un récepteur local.

## ❖ **Structure de la thèse**

La présente thèse est organisée en six chapitres :

Nous entamerons le premier chapitre, par des généralités sur l'exploitation des énergies renouvelables et ses applications dans le domaine de production de l'électricité, ainsi que les différentes structures des systèmes de génération d'énergie électrique. Un état d'art de chaque technologie sera brièvement décrit. Les principes de fonctionnement des différentes centrales.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation et la commande de la turbine éolienne. La première partie de ce chapitre met en exergue des notions générales sur l'énergie éolienne. Les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur

seront brièvement présentés. Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées afin de montrer les avantages inégalés de la GADA surtout en grande puissance et à vitesse variable. La seconde partie du chapitre est consacrée à la modélisation et la commande de la partie mécanique de l'éolienne. Nous modéliserons d'abord la turbine éolienne ainsi que l'arbre mécanique en décrivant l'utilité du multiplicateur. Ensuite, nous étudierons la commande de la turbine afin de maximiser la puissance captée sans se soucier de la partie électrique. La stratégie MPPT repose sur le principe de l'extraction du maximum de puissance de l'éolienne et de son transfert vers l'utilisateur. Des résultats de simulation seront présentés dans l'objectif de vérifier et valider la stratégie de contrôle.

Le troisième chapitre présentera des généralités sur la GADA, son fonctionnement dans un système éolien suivi par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers cette génératrice et les types de convertisseurs de puissance qui leur sont associés. Puis nous procéderons à la mise en équations de la machine asynchrone à double alimentation. Afin de simplifier les équations de cette machine, nous utiliserons la transformation de PARK. Ensuite, nous présenterons la mise en équations des convertisseurs de puissance de la structure choisie.

Notons que dans ce chapitre, le réglage classique des puissances statoriques active et réactive d'un système éolien à base d'une GADA est présenté. Ainsi, nous aborderons les différentes méthodes d'orientation du flux statorique, à savoir la méthode directe et la méthode indirecte et nous comparerons leurs performances en termes de suivi de consigne, sensibilité aux perturbations et robustesse vis-à-vis les variations des paramètres de la génératrice.

Le quatrième chapitre est divisé en deux principales parties ; la première traitera le réglage par mode glissant classique d'ordre 1 avec surface de commutation non linéaire. Nous présenterons le concept général des systèmes à structure variable avec mode de glissement. Puis, nous aborderons la commande de la GADA par cette technique pour concevoir des régulateurs de puissances statoriques active et réactive, en synthétisant le réglage selon le modèle réduit non-linéaire obtenu par orientation du flux statorique par le biais des tensions d'alimentation. Dans la seconde partie de ce chapitre, une stratégie de commande par mode glissant flou adaptatif sera proposée afin de répondre aux objectifs définis, c'est-à-dire une commande robuste donc augmentant la fiabilité, améliorant le rendement énergétique, et qui

avec le peu de broutement qu'elle engendre, limite le stress mécanique sur l'arbre de transmission.

Le dernier chapitre traite le dimensionnement d'un système hybride constitué de systèmes de conversion d'énergie renouvelables, PV, éolien, diesel et le système de stockage afin d'alimenter un récepteur électrique local. Conséquemment nous avons montré l'intérêt bénéfique d'un système hybride par apport au système d'énergie conventionnelle dédié à l'alimentation en énergie électrique des zones isolées autant que le système de stockage, qui est indispensable dans ce type de systèmes de génération d'énergie électrique.

Cette thèse est parachevée par une conclusion générale dans laquelle sont valorisés les différents développements effectués. Des perspectives pour ce travail sont également envisagées.

---

---

# **Chapitre I**

**Etat de l'art des systèmes d'énergies  
renouvelables**

---

---

## I.1. Introduction

Les difficultés d'approvisionnement en énergie rencontrées à l'échelle mondiale sont dues principalement à plusieurs facteurs, qui sont : une consommation énergétique croissante, une diminution des ressources fossiles et les effets néfastes des changements climatiques sur les écosystèmes (canicule, tempête, inondations, etc.). C'est pourquoi il est plus que jamais urgent de trouver des solutions de production d'énergie techniquement réalisables et qui satisfassent aux exigences en matière de durabilité et respect de l'environnement. Ces exigences peuvent se résumer dans la définition même du développement durable proposée en 1987 par la commission mondiale sur l'environnement et le développement dans son rapport de Brundtland, à savoir : Un développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs exigences [14] et [15].

Pour fixer le point optimal et répondre aux exigences actuelles il faut d'une part, que tout système énergétique durable sera basé sur une utilisation intelligente des sources traditionnelles grâce au développement de la technologie numérique.

D'autre part, le recours accru aux énergies renouvelables est devenue nécessaire suite à la maîtrise de leurs technologies. Ces dernières sont naturellement décentralisées, il est intéressant du point des vues écologique et économique de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement.

Dans le cadre d'amplification et de vulcanisation de ces nouvelles ressources énergétiques plusieurs systèmes ont été proposés et réalisés afin de répondre aux exigences actuelles. Nous citons par exemple à titre indicatif l'énergie solaire, l'éolienne et biomasse qui attirent l'attention au niveau de la production de l'électricité à grande échelle [16]. Cependant, elles présentent un inconvénient commun par leur caractère imprévisible et la dépendance des conditions météorologiques et climatiques qui changent avec le temps. Les systèmes multi-sources qui combinent entre plusieurs formes d'énergie peuvent répondre à ces inconvénients et assure la durabilité de la production.

Les énergies renouvelables regroupent un grand nombre de systèmes différents selon la ressource valorisée et la forme d'énergie obtenue. Ces dernières années, les évolutions observées concernent aussi bien l'amélioration des rendements de transformation et la diminution du prix de revient de l'énergie utile produite que la qualité du service énergétique et un confort accru à l'exploitation [17].

Du côté de la ressource, le potentiel des énergies renouvelables pourrait dépasser largement nos besoins, mais leur contribution dans le bilan énergétique dépend des surfaces mises à disposition, des investissements pour leur équipement et de la réduction de nos consommations [17].

Donc, nous entamerons ce chapitre par des généralités sur l'exploitation des énergies renouvelables et ses applications dans le domaine de production de l'électricité, ainsi que les différentes structures des systèmes de génération d'énergie électrique.

## **I.2. Génération d'énergie renouvelable**

On appelle énergie renouvelable un ensemble de ressources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, infiniment disponibles, particulièrement gratuites et sont compatibles avec quelque considération environnementale. Une source d'énergie est dite renouvelable à cause de sa disponibilité d'utilisation. Les technologies des énergies renouvelables offrent la promesse d'une énergie propre et abondante recueillie à partir de ressources auto-renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, la terre et les plantes. L'intérêt croissant pour le développement des énergies renouvelables est motivé par plusieurs constats : le changement climatique, l'augmentation de la demande d'énergie, la limitation des réserves de combustibles fossiles, le faible rendement global du système énergétique en particulier des pays occidentaux.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Le besoin d'une alternative renouvelable pour faire produire l'électricité a été le sujet de discussion pour plusieurs secteurs et aux niveaux d'un grand nombre de pays au monde entier comme le témoigne plusieurs documents scientifiques [18], et [19]. Les études ont été élaborées pour faire de cet outil non polluons l'axe de recherche pour plusieurs chercheurs afin de réaliser un but majeur celle de minimiser les effets négatifs de ressources classiques de production de l'énergie.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la

biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient du non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne. Y'on a pleinement d'énergies qui rentrent dans cette catégorie, elles sont classées comme suit figure (I.1)

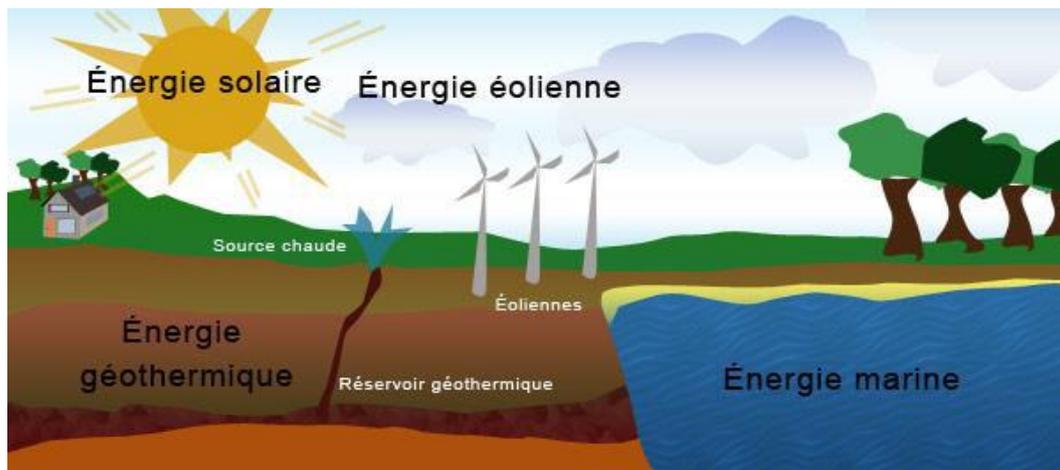


Figure I.1: Différents types d'énergies renouvelables.

### I.3. Les différents types énergies renouvelables

#### I.3.1. Production éolienne

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales. Cette source est non polluante. Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [20].

La production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier figure (I.2). Ceci est principalement dû à des raisons majeures tels-que les nouvelles technologies des machines électrique utilisées comme générateurs, l'électronique de puissance, la production de l'énergie propre qui respect l'environnement et le remplacement des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables sont des sources propres, renouvelables et gratuite, et peuvent présenter des avantages et aussi des inconvénients qu'on peut les considérés lors de l'utilisation.

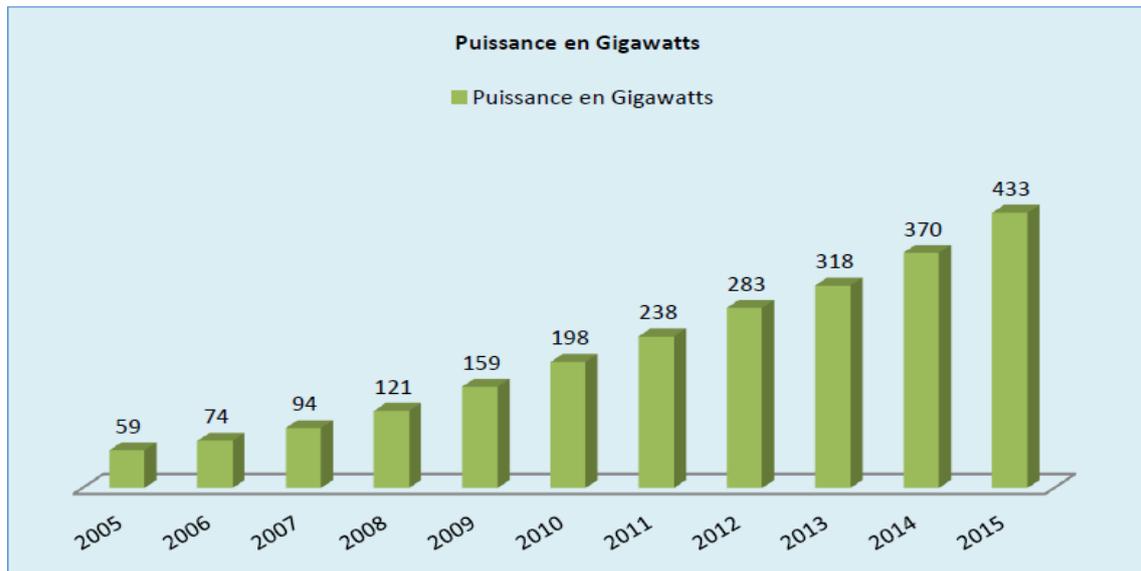


Figure I.2 : Développement de l'énergie éolienne mondiale.

### I.3.2. Énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable, propre, bon marché et abondamment disponible. Elle est reçue sur Terre sous forme cyclique, intermittente et diluée avec une très faible densité de puissance de 0 à 1  $KW/m^2$ . L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et parvenant à la surface de la Terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre. Le soleil rayonne environ  $3.8 \times 10^{26} W$  de puissance dans toutes les directions. Sur ce, environ  $1.7 \times 10^{17} W$  est reçu par la Terre.

Alors on distingue deux types de l'énergie solaire : l'énergie à effet thermique, et à l'effet photovoltaïque.

#### I.3.2.1. Thermo solaire

L'énergie solaire est exploitée sous deux formes d'énergie à savoir l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermique. Toutefois, la technologie de production d'électricité par l'énergie solaire thermodynamique s'appuie sur l'utilisation de divers types de récepteurs (paraboles, capteurs cylindro-paraboliques, tours).

Les principes physiques fondamentaux sur lesquels se basent cette production d'énergie sont notamment l'absorption, et la conduction thermique. Dans le cas particulier des systèmes

à concentration (centrale solaire thermodynamique, four solaire, etc.), la réflexion joue aussi un rôle important [21].

Les formes d'utilisation finale de cette énergie sont :

- ❖ A basse température (30 à 100°C) Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, machines.
- ❖ A moyenne température (100 à 500°C) Séchage, cuisson, stérilisation, distillation,.....
- ❖ A haute température (500 à 1800°C) Verreries, cimenteries, métallurgie, traitements chimiques.

L'énergie solaire thermique est une technique qui remonte au XVIIIème siècle pour sa première utilisation. Et c'est à cette époque que le chimiste Antoine Laurent de Lavoisier inventa le premier four solaire. Cette découverte a pour principe de concentrer les rayons solaires à l'aide d'une lentille liquide afin de produire de la chaleur et de fondre des métaux et. Alors, le marché de l'énergie solaire thermique a commencé à apparaître dans les années 1970- 1980, après la crise pétroliers. Entre 1984 et 1990, Luz International Ltd a construit des installations solaires à récepteurs cylindro-paraboliques dans le désert Mojave en Californie, avec une puissance totale de 354 MW.

Actuellement, l'énergie solaire thermodynamique est en croissance rapide. Cependant, l'Espagne a été le centre du développement de l'énergie solaire thermique et reste de loin le premier producteur d'électricité par cette technique avec 2 304 MW en service, suivie par les États-Unis avec 765 MW en service, et 5 600 MW de projets annoncés de centrales thermiques solaires,[21]. Parmi les investissements de l'Algérie dans cette technologie, on cite le village solaire à Adrar et la centrale électrique hybride de Hassi R'mel mise en service en 2011 [22].

L'énergie solaire à concentration est exploitée pour l'installation à grande échelle pour la production d'électricité différemment aux capteurs thermiques qui exploitent l'énergie solaire pour chauffer l'eau. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'énergie électrique. Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent une grande variété de systèmes disponibles tant au niveau de la concentration du rayonnement, du choix des fluides caloporteur et thermodynamique ou du mode de stockage [22]. Il existe plusieurs types de centrales solaires thermiques, qui utilisent différents capteurs pour concentrer le rayonnement solaire.

- ✓ Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques.

- ✓ Les centrales à tour.
- ✓ Les centrales à capteurs paraboliques.
- ✓ Les centrales solaires à miroir de Fresnel.

L'Algérie est considérée parmi les pays qui disposent d'un gisement solaire très important d'où la production de l'énergie électrique à partir du soleil compte parmi les priorités de la politique du gouvernement pour une indépendance des ressources pétrolière.

### **I.3.2.2. L'énergie solaire photovoltaïque**

Nous allons présenter dans cette partie des notions de base sur l'énergie photovoltaïque et les systèmes de production de cette énergie. Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, pendant les dernières décennies, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an. Cette croissance actuelle est due principalement aux importantes innovations technologiques et une baisse de coût des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de la recherche et du développement dans le domaine de l'électronique de puissance. Le mot « photovoltaïque » Historiquement vient du grec « phôtos » signifiant lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique [23].

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet et on considère aujourd'hui qu'il suffit de 3 à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessité. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée. Des progrès

Technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale.

Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication, balises maritimes, etc..).

### I.3.3. L'énergie Hydraulique

L'utilisation de l'énergie hydraulique remonte à l'époque des Romains où elle était transformée en énergie mécanique grâce à une roue hydraulique pour faire tourner des machines. Ces installations étaient d'autant plus utilisées à l'époque du Moyen Âge où elles servaient notamment dans les moulins à broyer les grains de blés ou de maïs pour en faire de la farine. Cette puissance hydraulique était aussi limitée au niveau du diamètre de la roue sans prendre en considération la hauteur de chute de l'eau, voir figure (I.3). Actuellement la hauteur de chute de l'eau apporte un rendement beaucoup plus élevé, grâce à des conduites forcées.

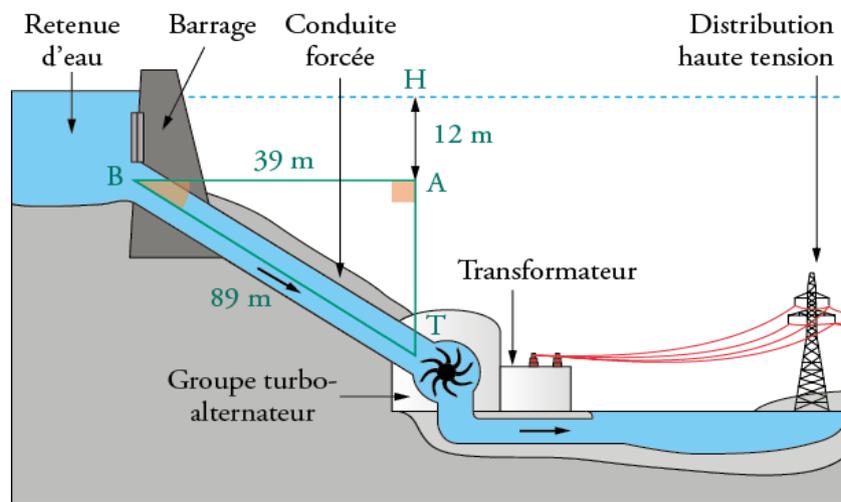


Figure I.3 : Schéma de principe d'une centrale gravitaire.

Les barrages hydroélectriques sont des sources d'énergie qui permettent de créer une grande quantité d'électricité, mais aussi d'adapter la production à la consommation de manière rapide tout en n'ayant aucune émission de CO<sub>2</sub>, ces caractères propres à l'hydroélectricité rendent son expansion très rapide. Cependant avec le développement des équipements de cette technologie, les centrales hydroélectriques sont classées en trois types principaux [24] :

- ✓ Les centrales dites gravitaires pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus du cours d'eau par gravitation.
- ✓ Les Stations de Transfert d'énergie par Pompage (S.T.E.P.) aussi connues sous l'appellation centrale hydraulique à réserve pompée ou centrale de pompage-turbinage, qui permettent de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur.

- ✓ Les usines marémotrices au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées, des courants marins permanents.

L'énergie hydroélectrique prend une ampleur de plus en plus grande au 20<sup>ème</sup> siècle, pour atteindre en 2012, une puissance de 3 663.4 TW d'électricité produite pendant l'année et prend donc la deuxième place en termes de production d'énergie au monde avec une production qui représente 16.2% de l'énergie produite. En 2013, des études ont montrées que, l'hydraulique représente plus de la moitié de électricité consommée par le Norvège, Brésil, Venezuela, Canada, Suède. En 2015, l'hydroélectricité en Chine prend la première place mondiale, avec une production annuelle de 3 000 MW, [19].

#### **I.3.4. L'énergie Géothermie**

Le terme de géothermie désigne aussi bien la science des phénomènes thermiques terrestres ainsi que la valorisation énergétique de ces derniers. Actuellement, elle représente une énergie renouvelable en forte extension. Cependant, pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Donc, dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure [24]. Le principe d'utilisation de la géothermie pour générer l'électricité est présenté sur la figure (I.4). Les auteurs Michel Bernier, Patrice Pinel, Richard Labib et Raphaël Paillot dans leurs travaux de recherches sur la technologie géothermie depuis 1992 jusqu'au jour montre clairement l'importance de cette forme d'énergie renouvelable.

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement : la haute (> 180 °C), moyenne (> 100 °C), basse (> 30 °C) et très basse énergie. Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé.

Aujourd'hui, cette dernière est effectivement exploitée dans le monde comme, l'indique la figure (I.5), ou la production d'électricité géothermique a été estimée à 75 TWh.

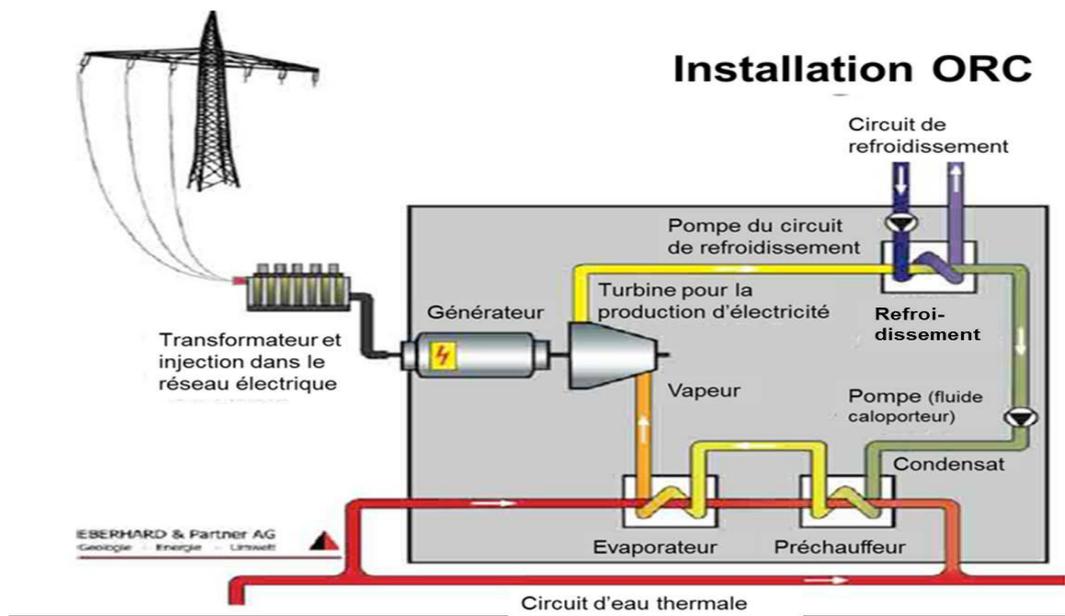


Figure I.4 : Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique.

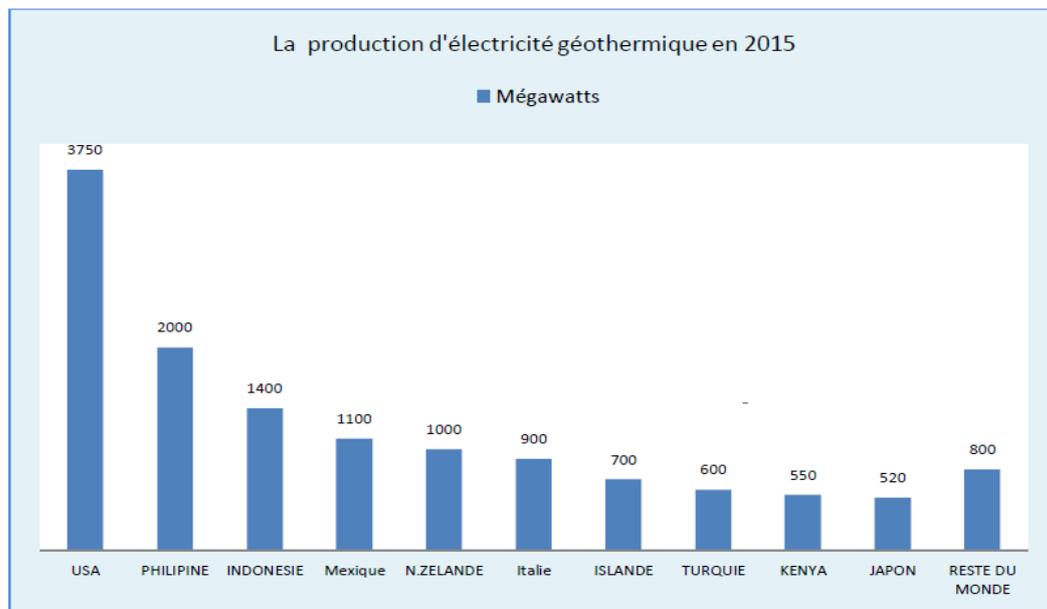


Figure I.5 : Production de l'électricité géothermie par pays.

### I.3.5. L'énergie biomasse

La bioénergie englobe diverses formes d'énergie utilisable tirée de matières appelées biomasse. La biomasse est une source d'énergie perpétuelle et renouvelable (activité humaine, agricole, industrielle génère des déchets). Alors, des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- ✓ La fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie.
- ✓ La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autre, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro, comme le montre le cycle de la figure (I.6).

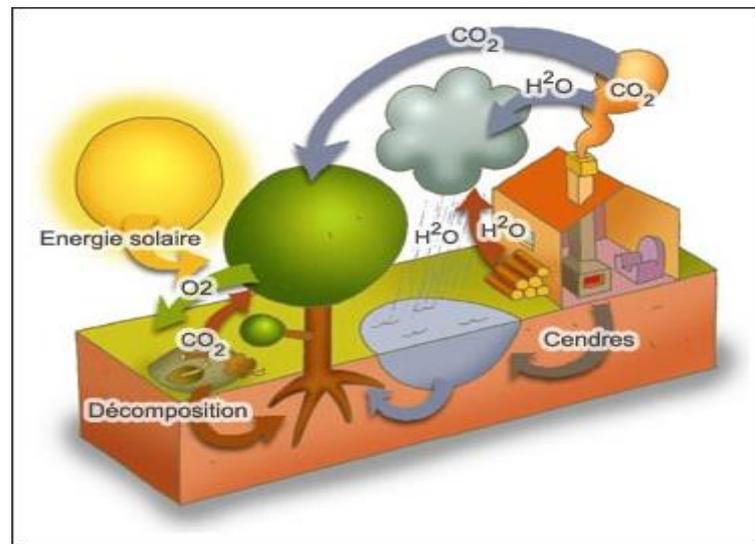


Figure I.6 : Énergie Biomasse.

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivées ou déchets sont également classés dans la biomasse.

Des différents types sont à considérer :

- **La biomasse solide**

Ce sont tous matériaux d'origine biologique employés comme combustible pour la production de la chaleur, d'électricité ou de carburants. Il existe aujourd'hui des appareils à combustible bois innovants et efficaces à la disposition des particuliers comme des collectivités ou industries.

- **Le biogaz**

Ce sont les matières organiques qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation (méthanisation). on l'appelle aussi << gaz naturel renouvelable >>.

par opposition au gaz d'origine fossile. Il sert à la production de la chaleur, d'électricité ou de biocarburant.

- **Les biocarburants**

Les biocarburants, parfois appelés agro carburants, sont issus de la biomasse. Il existe principalement deux filières industrielles : l'éthanol et le biodiesel. Ils peuvent être utilisés purs ou comme additifs aux carburants classiques [26].

Une étude réalisée [19] sur le potentiel des énergies renouvelables au niveau mondial, estime que la biomasse-énergie, pourrait couvrir une part importante des besoins énergétiques mondiaux comme le montre le tracé de développement reproduit depuis l'année 2005 présenté sur de la figure (I.7).

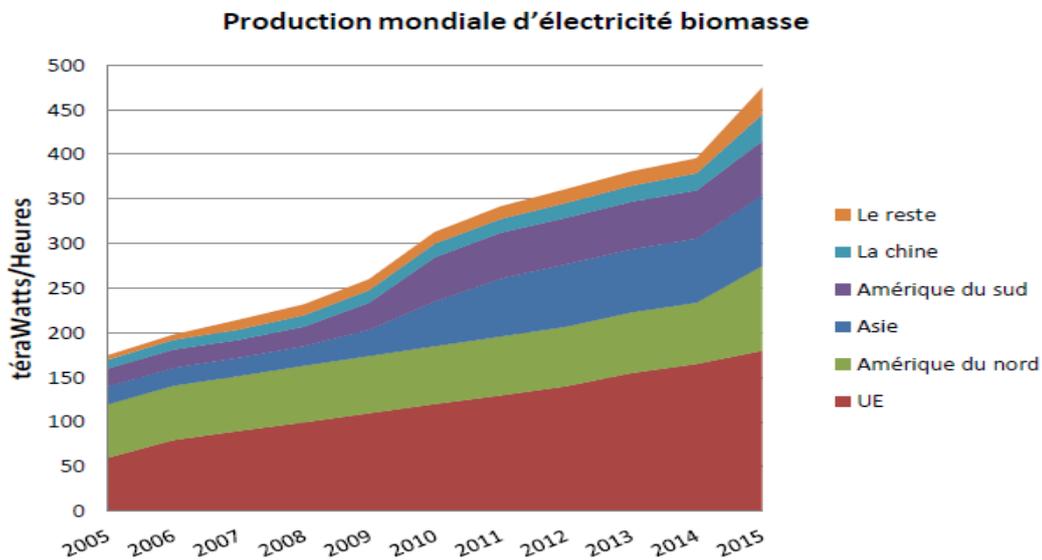


Figure I .7 : Production mondiale d'électricité biomasse bioénergie (par pays et par région), 2005–2015.

Le graphe précédent indique une grande concurrence entre les pays développés sur l'utilisation de la biomasse-énergie, cela implique, donc que cette dernière pourrait couvrir une part importante des besoins énergétiques mondiaux dans un futur proche.

### I.3.6. Energie de la mer

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique [27]. Il existe trois grandes familles de

systèmes : rampe de déferlement ou overtopping (Maurice, Maré, Tapchan en Norvège, Wave Dragon en Danemark, FWPV...), colonne d'eau oscillante ou OWC (Kvaerner en Norvège, Pico en Açores en Portugal, Islay en Ecosse, Limpet, Osprey...) et puis les flotteurs articulés (Cockerel raft, Pelamis en Ecosse) ou les flotteurs sur ancrage (Salter duck, AWS en Portugal). Des projets de recherche sont aussi en cours.

Un des exemples très innovateur est le projet de Système Electrique Autonome pour la Récupération de l'Energie des Vagues (SEAREV) [28].

Une autre façon de la récupérer de l'énergie de la mer est la production grâce à la marée qui est due à l'action de la lune sur les eaux. Les barrages ou des hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle comme c'est le cas de l'usine de la Rance ou bien celle d'Annapolis au Canada.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées.

#### **I.4. Production des énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables, et particulièrement l'électricité produite à partir de l'éolien et du solaire, connaissent depuis le début des années 1990 un développement important. En faisant apparaître la part de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde, ainsi dans notre pays l'ALGERIE, qu'il révèle quels sont les pays les plus gros producteurs et les zones les plus dynamiques en termes de potentiels énergétiques.

##### **I.4.1. Production dans le monde**

Les énergies renouvelables sont maintenant reconnues comme des sources d'énergies habituelles et majeures à travers le monde. Leur croissance rapide, en particulier dans le secteur électrique, est le fruit de plusieurs facteurs. On trouve qu'une diminution de l'électricité nucléaire est effectuée, par contre une progression de l'électricité d'origine renouvelable est atteinte par l'utilisation dans divers domaines.

**ONU Changements climatiques Infos, 4 avril 2019** – Selon de nouvelles données publiées par l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), la tendance à la forte croissance de la capacité de production d'énergie renouvelable, qui dure depuis une

décennie, s'est poursuivie en 2018, avec une augmentation mondiale de 171 gigawatts (GW). L'augmentation annuelle de 7,9 % a été soutenue par les nouveaux apports d'énergie solaire et éolienne, qui ont représenté 84 % de la croissance. Un tiers de la capacité mondiale de production d'électricité est aujourd'hui basée sur les énergies renouvelables.

Points saillants par technologie

**Hydroélectricité** : la croissance de l'hydroélectricité a continué de ralentir en 2018, seule la Chine a ajouté une proportion notable de nouvelles installations en 2018 (+8,5 GW).

**Énergie éolienne** : la capacité mondiale d'énergie éolienne a augmenté de 49 GW en 2017. La Chine et les États-Unis ont continué de représenter la plus grande part de l'expansion de l'énergie éolienne, avec des augmentations respectives de 20 GW et de 7 GW. D'autres pays ont connu une croissance de plus de 1 GW : Allemagne, Brésil, France, Inde, et Royaume-Uni.

**Bioénergie** : Trois pays ont représenté plus de la moitié du niveau relativement faible d'expansion de la capacité bioénergétique en 2018. La Chine a augmenté sa capacité de 2 GW et l'Inde de 700 MW. La capacité a également augmenté de 900 MW au Royaume-Uni

**Énergie solaire** : La capacité d'énergie solaire a augmenté de 94 GW l'an dernier (+ 24 %). L'Asie a continué de dominer la croissance mondiale avec une augmentation de 64 GW (environ 70% de l'expansion mondiale en 2018). Représentant la plus grande part, Chine, Inde, Japon et République de Corée ont maintenu la tendance de l'an dernier. Les États-Unis (+8,4 GW), l'Australie (+3,8 GW) et l'Allemagne (+3,6 GW) ont également enregistré des hausses importantes. D'autres pays ont connu des augmentations significatives en 2018 : Brésil, Égypte, Pakistan, Mexique, Pays-Bas, Mexique et Turquie.

**Géothermie** : L'énergie géothermique a augmenté de 539 MW en 2018, l'essentiel de la croissance ayant eu lieu en Turquie (+219 MW) et en Indonésie (+137 MW), pays suivis par les États-Unis, le Mexique et la Nouvelle-Zélande

Au niveau mondial, la capacité totale de production d'énergie renouvelable a atteint 2 351 GW à la fin de l'année dernière, soit environ un tiers de la capacité électrique totale installée. L'hydroélectricité représente la part la plus importante avec une puissance installée de 1 172 GW, soit environ la moitié du total. L'énergie éolienne et l'énergie solaire représentent la majeure partie du reste avec respectivement des capacités de 564 GW et 480 GW. Les autres énergies renouvelables comprennent 121 GW de bioénergie, 13 GW de géothermie et 500 MW d'énergie marine (marée, vagues et océan).

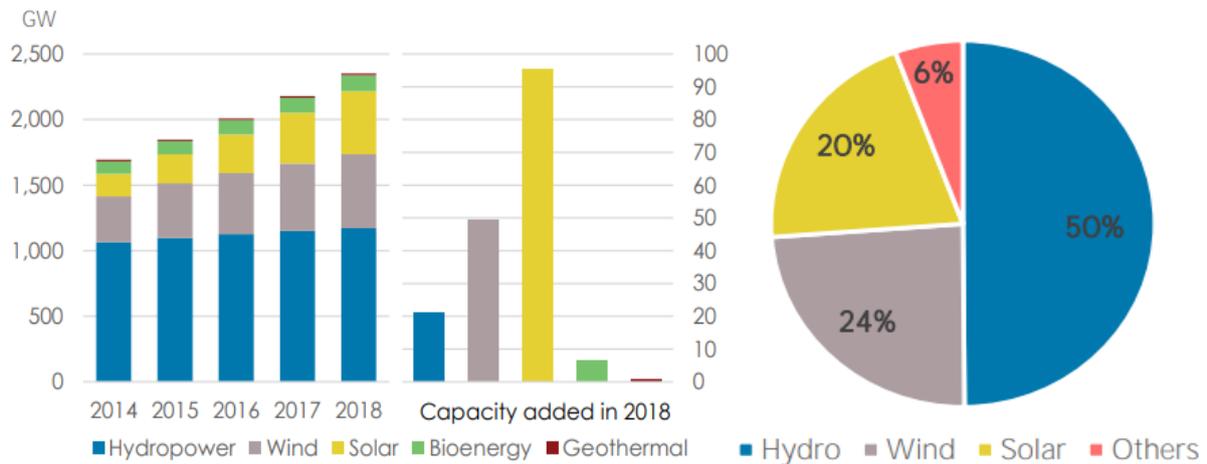


Figure I.8 : Capacité de production renouvelable par source d'énergie.

#### I.4.2. Les énergies renouvelables en Algérie

L'ALGERIE est un pays qui possède un potentiel en énergie fossile et renouvelable très appréciable, notamment pour le Gaz et l'énergie solaire. Le taux d'irradiation solaire dans le Sahara est le plus élevé dans la méditerranée. L'économie algérienne se base principalement sur l'exportation des énergies fossiles épuisables et polluantes, chose qui la rend vulnérable. Depuis février 2011, les autorités publiques algériennes ont élaboré un nouveau programme énergétique qui a pour but le développement des énergies renouvelables. Il sera notamment axé sur l'énergie solaire et éolienne.

L'objectif principal de cette nouvelle politique est de préparer le pays à l'ère post-pétrolière et permettre aux populations, en sites enclavés et hors réseau conventionnel, de bénéficier également des avantages indéniables de l'énergie électrique et calorifique à partir des sources d'énergies renouvelables localement disponibles et aisément mobilisables avec les techniques et les technologies mûres actuelles [29].

#### I.4.3. Situation des énergies renouvelables en Algérie

L'ALGERIE s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur d'un programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030, voir figure (I.9). L'ALGERIE prévoit également

l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable [30].

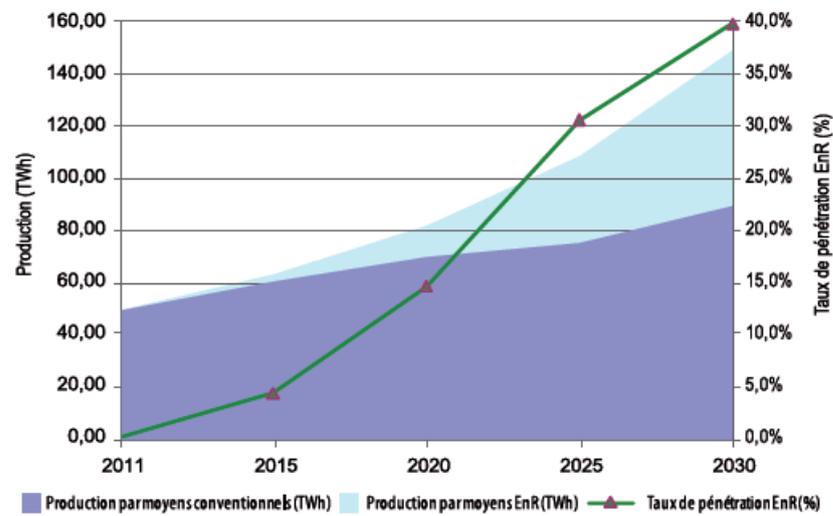


Figure I.9 : Production nationale des énergies renouvelables en TWh [30].

Le programme des énergies renouvelables est défini pour (figure (I.10)):

- 37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.
- D'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2000 MW.
- D'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 22000 MW, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent

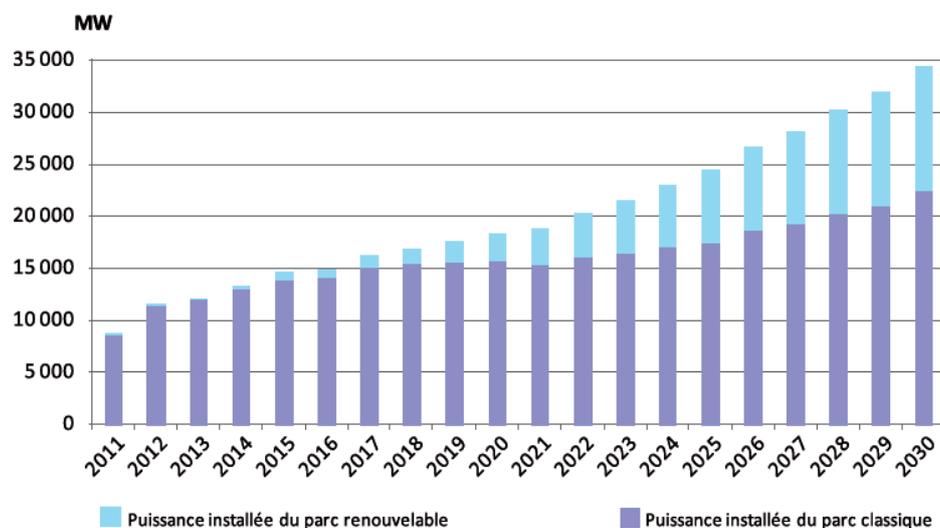


Figure I.10 : Installation du parc de la production nationale en MW [30].

### **I.6. Avantage des énergies renouvelables**

- ❖ Les énergies renouvelables sont disponibles naturellement.
- ❖ Elles ne produisent pas de gaz à effet de serre.
- ❖ Les conséquences des accidents, dus à ces énergies, ne sont pas importantes et ils sont faciles à résoudre par rapport aux énergies conventionnelles (centrale nucléaire ou pétrolière).
- ❖ Le coût d'une énergie renouvelable est principalement fixé par l'investissement industriel.
- ❖ La destruction des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, rapide et peu coûteux.

### **I.7. Inconvénients des énergies renouvelables**

- ❖ L'intermittence des sources des énergies renouvelables (à l'exception de l'énergie géothermique).
- ❖ Les énergies renouvelables demandent de l'espace et ont un impact sur les usages des territoires.
- ❖ Une énergie renouvelable n'est pas nécessairement propre, et inversement (l'énergie issue de la combustion de la biomasse est propre à condition que la production ne soit pas excessive et permette à la flore de réabsorber tout le dioxyde de carbone dégagée).
- ❖ La construction des installations influence l'aspect visuel du paysage
- ❖ Les sources renouvelables offrent une variation indépendamment de la demande, comme les énergies solaire et éolienne qui exigent l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie.

### **I.8. Systèmes de stockage pour la production d'électricité**

L'utilisation de sources énergie renouvelable induit le concept de stockage d'électricité en raison du caractère intermittent de ces sources (comme l'énergie solaires éolienne...). L'utilisation du moyen de stockage d'électricité est très variée; elle dépend de la nature des besoins et du type d'applications. En particulier, les SEH géographiquement isolés et non raccordés au réseau, qui intègre au moins une source énergie renouvelable nécessitant un système de stockage. Deux types de stockage sont utilisés dans les SEH : le stockage à court terme et le stockage à long terme.

- ✓ La stratégie de stockage à court terme permet de filtrer les fluctuations des ER, cette stratégie réduit également le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels, donc la consommation de carburant. Par contre,
- ✓ Le stockage à long terme est utilisé pour assurer une continuité d'approvisionnement de l'énergie pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours).

Le système de stockage peut être aussi utilisé avec les systèmes raccordés au réseau électrique, afin d'éliminer les fluctuations de puissance à court terme, de plus d'assurer la continuité du service en cas de défaillance du réseau.

### **I.9. Energie renouvelable et systèmes de stockage**

Une meilleure efficacité énergétique est une conséquence de l'utilisation du stockage d'énergie. Cependant, le stockage d'électricité peut avoir aussi un effet profond sur l'économie et l'utilité des sources d'énergie renouvelables. L'énergie du vent (éolienne), du soleil (solaire), des marées, des vagues sont toutes des sources intermittentes ou imprévisibles. Ces deux caractéristiques sont un handicap qui rend ce type d'énergie moins convenable aux yeux d'un opérateur de réseau de puissance et moins facile à gérer en grandes quantités. Il y a une limite de la quantité de puissance imprévisible qu'un réseau peut accepter tout en fournissant un bon service.

Si le stockage d'énergie est ajouté à l'utilisation de ces sources renouvelables, la situation devient complètement différente. L'énergie du système éolien ou solaire peut être maintenant utilisée directement ou gardée. La production de ces systèmes est moyennée. Tantôt les pics comme les creux de production sont adaptés par l'unité de stockage. En conséquence, la source d'énergie devient prévisible. Ceci la rend beaucoup plus facile de dispatcher et permet aussi à plus grandes quantités de puissance d'être acceptées sans affecter la qualité de fourniture d'énergie au réseau de puissance.

Toutefois, de nos jours, la combinaison technologie renouvelable et stockage d'énergie a un bilan économique peu rentable. Mais au fur et à mesure que le prix des énergies renouvelables diminue, que celui des combustibles fossiles augmente, et que les avantages des systèmes de stockage d'énergie de grande capacité sont de plus en plus acceptés, l'aspect économique sera sans doute beaucoup plus intéressant.

**I.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation des sources d'énergies renouvelables les plus utilisées. L'état d'art des formes d'énergies et son développement ont été décrits. Nous avons conclu de ce passage que la production de l'énergie électrique par les bases renouvelable est devenue dans cette dernière décennie une occupation internationale. Poussé par le changement climatique, la pollution et la rationalisation des énergies fossiles, tous les pays consacrent un budget pour la réalisation des centrales d'énergie renouvelable. En plus, nous avons acquis beaucoup de savoir sur l'historique, la technologie et le fonctionnement des énergies renouvelables.

---

---

# **Chapitre II**

## **Modélisation et commande de la turbine éolienne**

---

---

## II.1. Introduction

Le besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables auxquels on peut se fier à long terme a fait accentuer l'intérêt actuel pour l'énergie éolienne pour les applications nationales, communautaires et particulières, du fait que cette énergie est renouvelable, fiable, rentable et non polluante. Les aides financières, les lois gouvernementales, l'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. L'évolution rapide de cette technologie a donné naissance aux éoliennes fonctionnant à vitesse variable dont le fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe [29].

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [30]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

## II.2. Aperçu Sur L'énergie Eolienne

### II.2.1. Historique

L'énergie éolienne a été utilisée pendant des milliers d'années par les humains. Les anciens Perses ont utilisé l'énergie du vent pour pomper l'eau avant la naissance du Christ, propulsion de voiliers, pompage d'eau et le broyage du maïs ont été les premiers dans le domaine d'application. Le Danemark a été le premier pays qui a utilisé le vent pour la production d'électricité. Les Danois utilisaient un WT de 23 m de diamètre en 1890 pour générer électricité. En 1910, plusieurs centaines d'unités de 5 à 25 kW étaient en service. Le célèbre dessin des moulins à vent hollandais est présenté à la figure (II.1) [31].

À l'échelle internationale, l'intérêt des énergies renouvelables a été augmenté depuis la première crise en 1973, et l'industrie des énergies renouvelables a fait des progrès significatifs

depuis le protocole de Kyoto (Japon, 1997) où des réductions collectives des émissions de gaz à effet de serre ont été convenues et divers développements ont été encouragés par les gouvernements du monde entier.



Figure II.1 : Le célèbre dessin des moulins à vent hollandais.

Dans les années 1970 et 1980, diverses configurations de WT à terre ont été étudiées, y compris les plans d'axe horizontal et vertical (voir la figure II.2). Progressivement, la conception de l'axe horizontal avec trois lames est venue dominer.

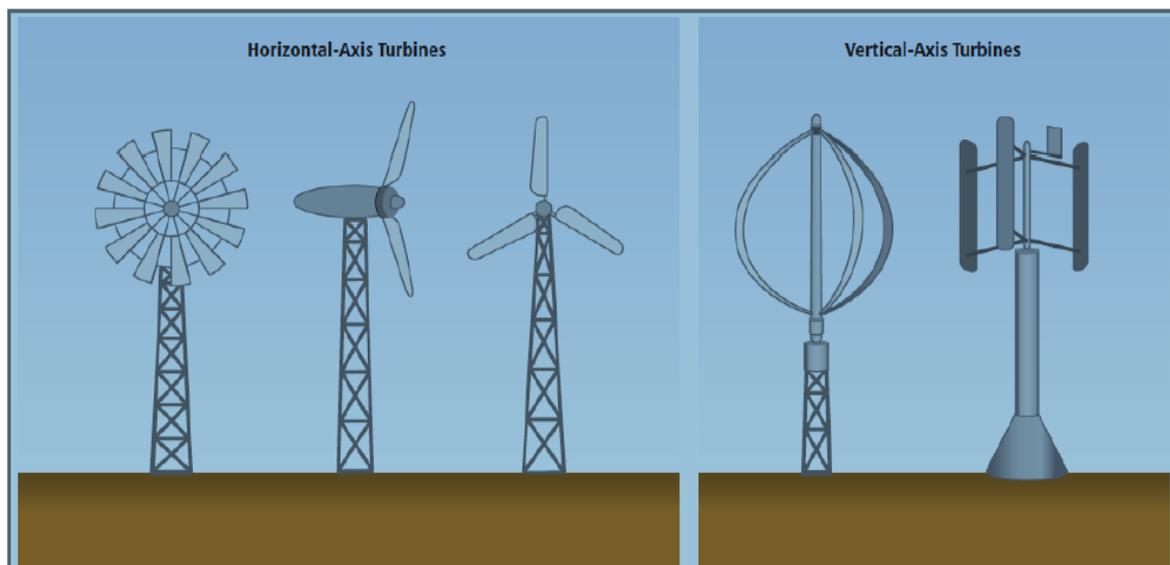


Figure II.2 : Les premiers turbinent à axe horizontal et vertical.

### II.2.2. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- **la transformation en énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- **Transformation en force motrice** (pompage de liquides, compression de fluides...).
- **la production d'énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

Un aérogénérateur, plus communément appelé "éolienne", est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure (II.3)).

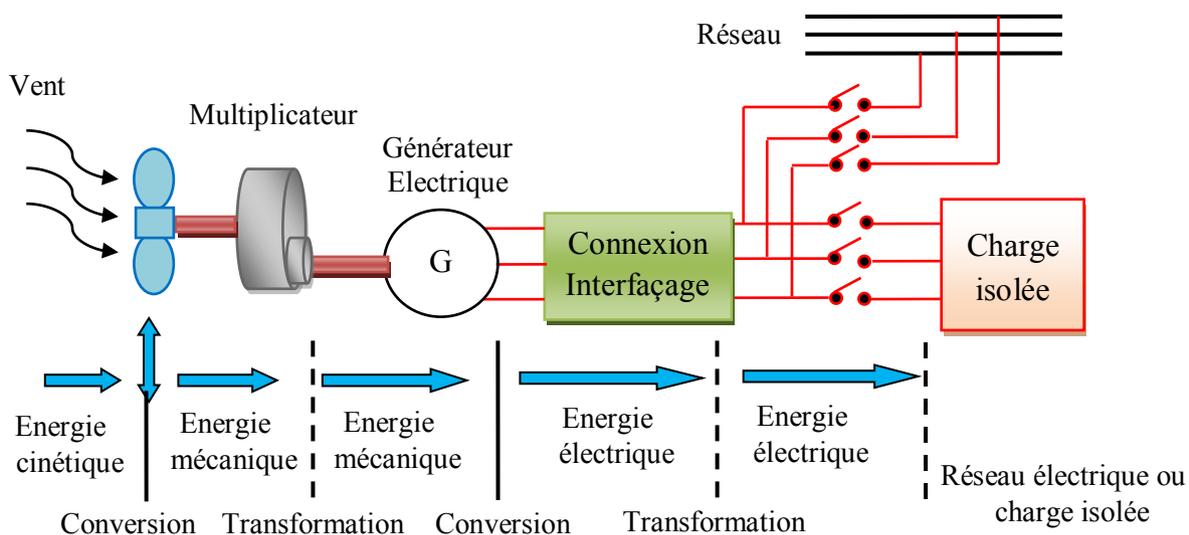


Figure II.3: Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation [32].

Au niveau mondial (figure II.4), les capacités éoliennes installées en 2017 se sont élevées à 52,6 GW, soit une baisse d'environ 4% par rapport à 2016 selon le GWEC (Global Wind Energy Council). Ce léger recul reflète, selon le secrétaire général du GWEC Steve Sawyer une plus grande maturité de la filière, «en transition vers un système basé sur le marché » et en compétition avec d'autres technologies (désormais) plus subventionnées.

Parmi les faits marquants de 2017 retenus par le GWEC figure un appel d'offres en Allemagne d'avril dernier ayant retenu 3 projets éoliens offshore ne demandant aucune subvention [32]. L'organisation signale par ailleurs les fortes chutes des coûts de production « dans des pays aussi variés que le Maroc, l'Inde, le Mexique et le Canada avec des projets à 0,03 \$/kWh et un récent appel d'offres au Mexique en dessous de 0,02 \$/kWh ».

Le GWEC n'a en revanche pas communiqué les données de production du parc éolien mondial en 2017, cette information devant être publiée ultérieurement. Selon les dernières données de l'AIE, l'éolien avait produit 838 TWh en 2015, soit un peu plus de 3% de la production électrique mondiale cette année-là.

### Évolution de la puissance du parc éolien mondial

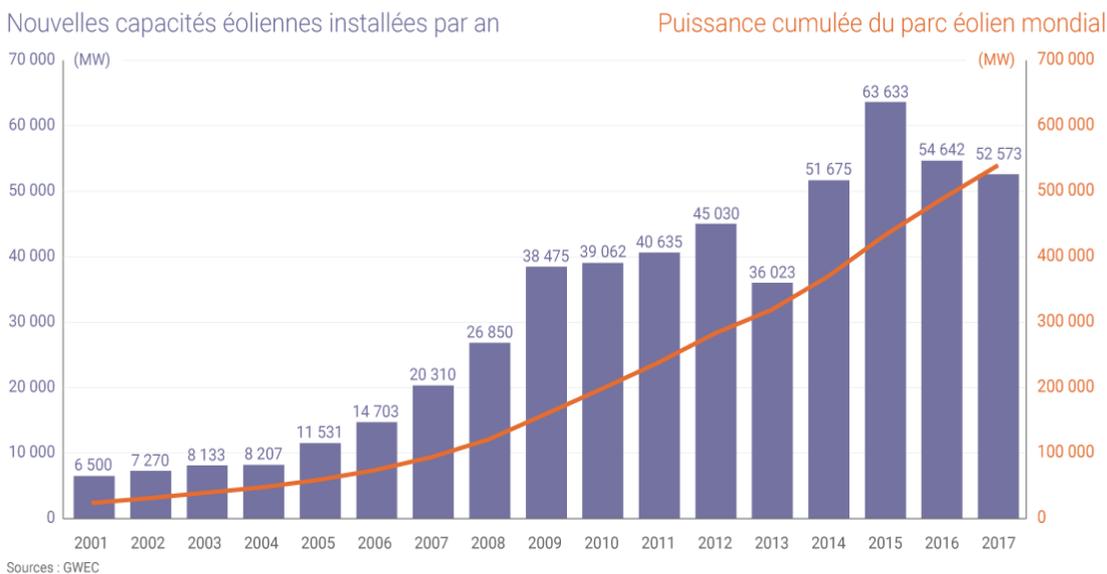


Figure II.4 : Evolution de la puissance du parc éolien mondial [32].

### II.3. Différentes technologies des éoliennes.

Selon l'utilisation et la technologie d'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées. On distingue deux grandes familles d'éoliennes [33] :

- Les éoliennes autonomes.
- Les éoliennes raccordées au réseau.

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes, parmi ces classifications la véritable et importante classification est celle basée sur l'orientation de l'axe de rotation de la turbine par rapport au vent (horizontal ou vertical), c.-à-d. qu'il existe des éoliennes à axe horizontal (HAWT) et des éoliennes à axe vertical (VAWT).

### II.3.1. Aéroturbines à axe vertical (VAWT).

Elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement facilement ainsi les opérations de maintenance, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car freiné par le relief, ce qui induit un faible rendement de ce type d'éolienne. De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent provenir de toutes les directions sans avoir à orienté le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924) [34].

#### II.3.1.1. Eoliennes à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Figure II.5). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

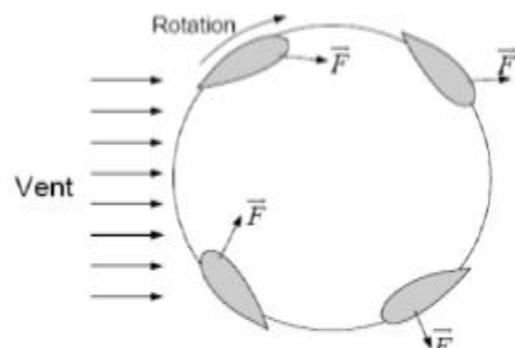


Figure II.5 : Eolienne à axe vertical (Structure de Darrieus) [35], [34].

### II.3.1.2. Eoliennes à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Figure II.6).

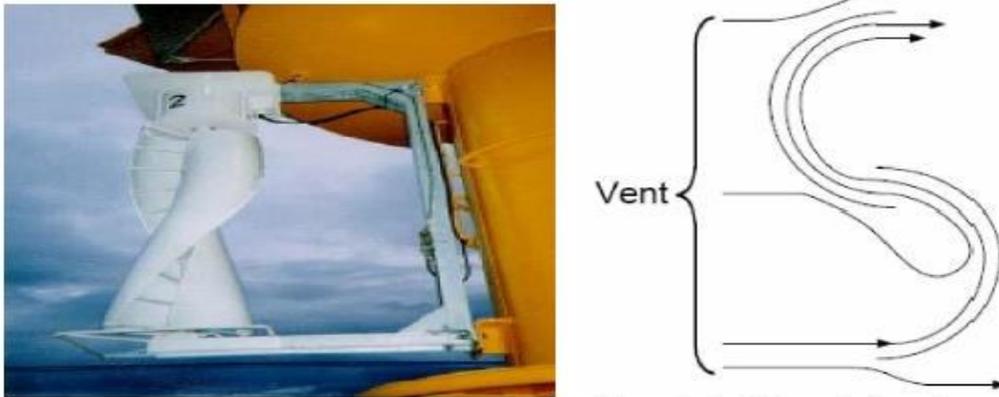


Figure II.6 : Eolienne à axe vertical (Structure de Savonius) [35], [34].

### II.3.2. Turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT).

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales, le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien voir la Figure (II.7) Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [36]. Dans la littérature, les principales éoliennes étudiées sont à axe horizontal et tripales [37] et c'est bien ce type d'éoliennes qui sera étudié dans ce chapitre.

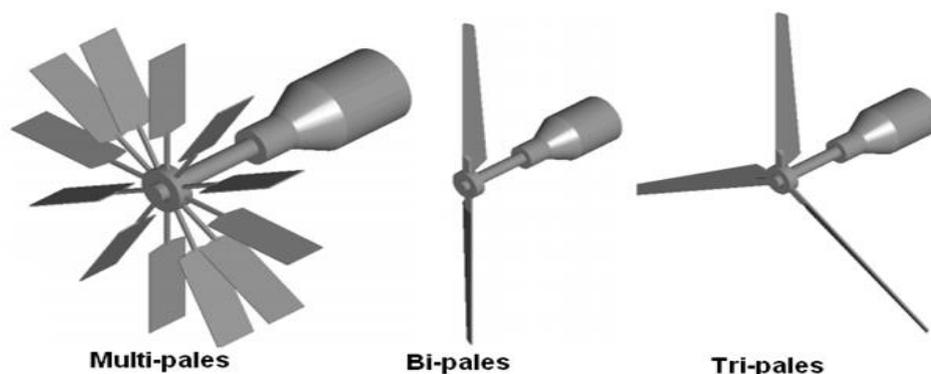


Figure II.7 : Turbines à axe Horizontal.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal : les éoliennes à marche lente et les éoliennes à marche rapide (Figure II.8).

### II.3.2.1. Les éoliennes à marche lente

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. De nombreuses éoliennes de ce type ont été construites aux Etats Unis dès 1870. Leur rendement est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée (Figure II.8) [38] [35], [8].

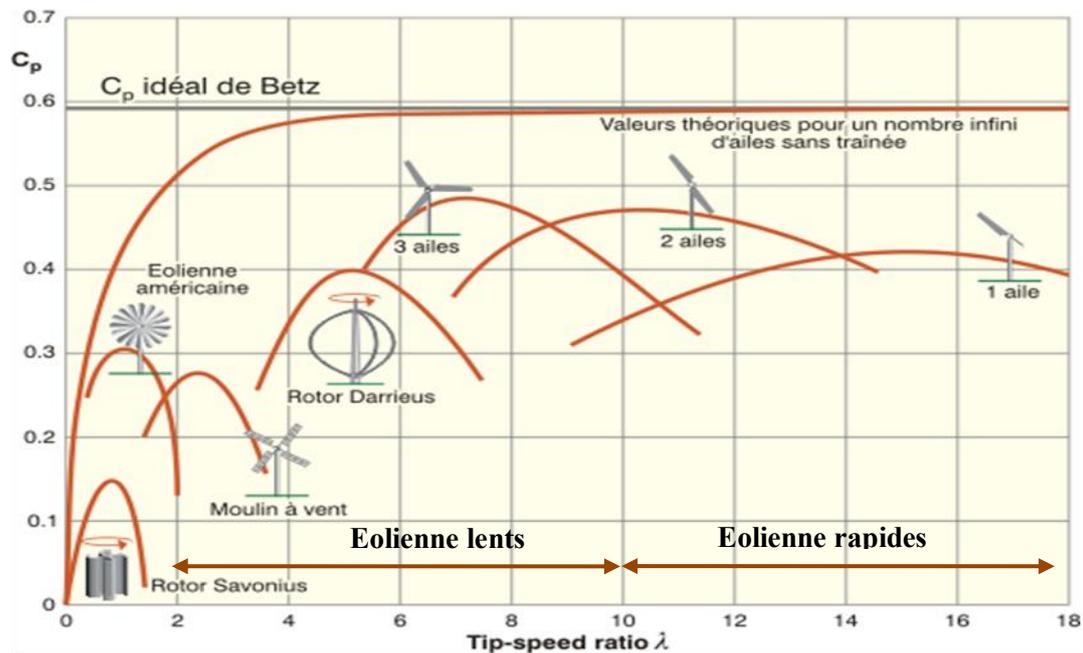


Figure II.8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [8].

### II.3.2.2. Les éoliennes à marche rapide

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs MW. Leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement en dessous d'une vitesse de vent de 3 m/sec. Les machines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques et ont un rendement énergétique un peu plus faible. Elles sont visuellement moins esthétiques. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants optent pour des aérogénérateurs tripales.

### II.3.3 Comparaison

Le tableau résume les points forts et faibles de chaque type de turbine. Pour les applications à grande puissance les Eoliennes à axe horizontal (HAWT) dominent le marché grâce à leur fort rendement et leur accès au vent fort. Par contre, les éoliennes à axe vertical (VAWT) sont plus appropriées pour les applications domestique en toit d'immeubles, vu que cela leurs donnent automatiquement accès au vent fort et qu'elles sont facilement abordable pour la maintenance.

Types de Turbines	Avantages	Inconvénients
Eoliennes à Axe Horizontal (HAWT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fort rendement de conversion d'énergie</li> <li>• Accès au vent plus fort</li> <li>• Régulation de la puissance via décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'installation élevé, mat très dur qui doit supporter le poids de la nacelle.</li> <li>• Des câbles plus long du haut de la tour jusqu'au la terre</li> <li>• Systèmes d'orientation requis</li> </ul>
Eoliennes à Axe Vertical (VAWT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de la surface.</li> <li>• Fonctionnement indépendant du sens du vent.</li> <li>• Adéquat pour les toits de d'immeuble</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement moins faible</li> <li>• Fluctuation importante du couple et forte vibrations mécaniques</li> <li>• Solutions limitées pour la régulation en cas de rafale de vent</li> </ul>

Tableau II.1 : Comparaison des éoliennes a axe horizontales et a axe vertical

### II.4. Puissance des éoliennes

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique, a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables [39]. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
grande	46 m et plus	Plus de 1 MW

Tableau II.2 : Différents catégories des éoliennes

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

## II.5. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : Le mât, le rotor et la nacelle (figure II.9).

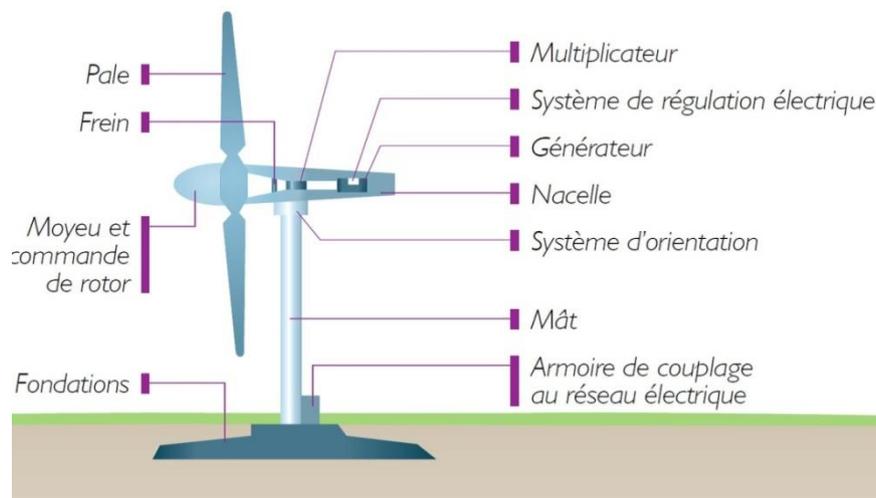


Figure II.9 : Principaux composants de l'éolienne moderne.

### II.5.1. La tour ou le mât

Il permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) et/ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électrique et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).

### II.5.2. Le rotor

Le rotor il est composé de plusieurs pales (en général trois) et du nez de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être branché directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Le rotor est relié à la nacelle par moyeu.

### II.5.3. La nacelle

La nacelle est montée au sommet du mât, elle abrite les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine, elle comporte :

➤ ***Le multiplicateur de vitesse***

Le multiplicateur de vitesse sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

➤ ***La génératrice***

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique synchrone ou asynchrone

➤ ***Contrôleur électronique - girouette - anémomètre***

Le contrôleur électronique est chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante, gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (capteur de vitesse du vent) et une girouette (capteur de direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes pouvant survenir.

➤ ***Le dispositif d'orientation de la nacelle***

Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée cela permet de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance.

➤ ***Le dispositif d'orientation des pales***

Il permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante à vent fort (turbines à vitesse variable) ou de maintenir une vitesse de rotation constante quel que soit la vitesse du vent (turbines à vitesse fixe).

➤ ***Un frein à disque***

Placé sur l'arbre rapide permet l'immobilisation du rotor lors de la maintenance et palier à une défaillance éventuelle du frein aérodynamique.

## II.6. État de l'art sur les génératrices d'éoliennes

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Le contrôle au niveau de cette dernière permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens.

### II.6.1. Eolienne à vitesse fixe [40]

Les premières éoliennes de grande puissance mises en oeuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (voir figure (II.10)). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).

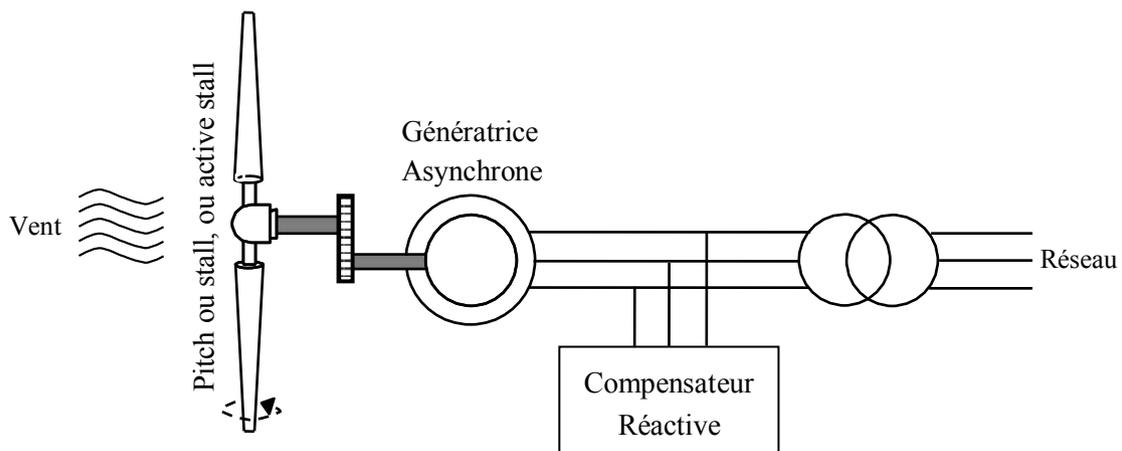


Figure II.10 : Vitesse fixe.

Ce type d'éolienne n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée, d'autant plus que la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau. Certaines éoliennes de ce type sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales (stall control). L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. La structure du rotor de la turbine est ainsi plus simple, mais les possibilités de réglage de la puissance sont encore plus limitées.

### II.6.2. Eolienne à vitesse variable

Cette topologie étant la plus populaire de toutes les variantes utilisées pour les Systèmes de Conversion d'Énergie Éolienne (SCEE) à moyenne et grande puissance. Le schéma

synoptique de cette configuration est illustré par la figure (II.11). La configuration de ce système est presque le même qu'avec la configuration précédente (figure II.10), sauf que la mis en place des deux convertisseurs de puissance en cascade (back to back), l'un est placé coté générateur CCG et l'autre du coté réseau CCR. Le contrôle du convertisseur CCG permet d'obtenir une puissance électrique active et réactive contrôlable de grande qualité, en outre le réglage du facteur de puissance est possible par le CCR [41]. L'utilisation des deux convertisseurs réversibles permet le transfert bidirectionnel de la puissance électrique rotorique entre le rotor et le réseau électrique selon que la génératrice opère en mode hyposynchrone / hypersynchrone. Ce système comporte une meilleure efficacité globale de conversion de puissance avec une plage de variation de vitesse étendue ( $\pm 30\%$ ) [42], et la performance dynamique est améliorée.

En plus, la taille des deux convertisseurs se trouve nettement réduites à 30% de la gamme de puissance de l'éolienne. Ces caractéristiques ont rendu le système d'énergie éolien basé sur la GADA largement utilisé aujourd'hui, avec une part du marché d'environ 50% [43]. Il existe deux catégories d'éoliennes telles que les éoliennes isolées (autonome) et les éoliennes connectées au réseau.

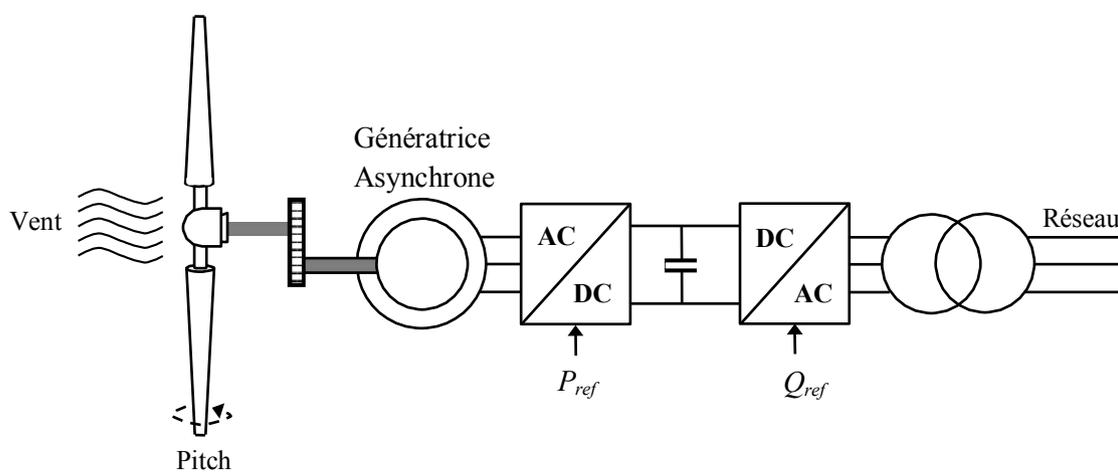


Figure II.11 : Vitesse variable.

### II.6.2.1. Eolienne isolée (autonome)

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans les gammes de puissance de quelques dizaines de Watts à quelques dizaines de kW pour d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météo. Les éoliennes de plus grande puissance sont utilisées pour la production destinée à alimenter en énergie électrique des villages isolés.

Les points communs entre toutes ces éoliennes sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateur (figure (II.12)), [44], [34].

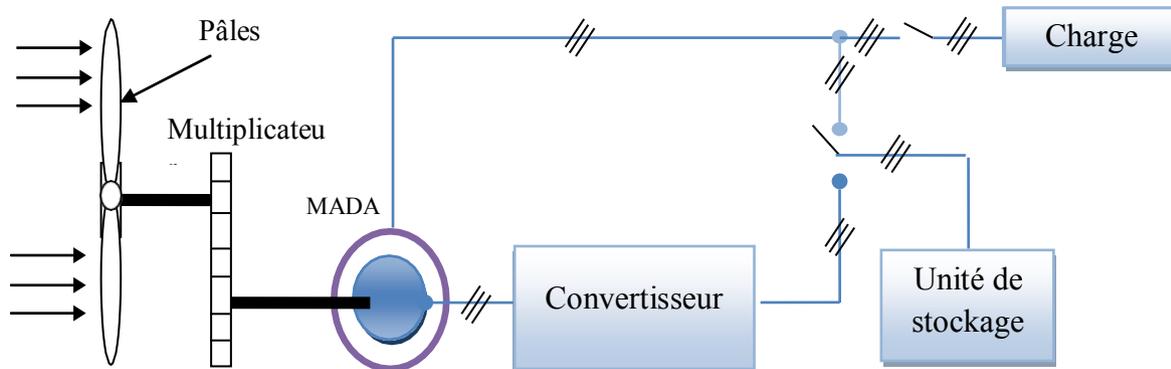


Figure II.12 : Eolienne isolée à base de la MADA.

### II.6.2.2. Eolienne connecté au réseau

Les éoliennes connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré appartenant à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local. Ce type de production décentralisée est rencontré de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre. Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou industriel, de 50 kW à 4.5 MW pour les plus récentes éoliennes du marché.

On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, particulièrement dans des applications en mer (Figure (II.13)) [45], vu que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante. Ces éoliennes fonctionnent en permanence et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordées à un réseau puissant afin de minimiser l'impact des fluctuations de la puissance générée par ces dernières.



Figure II.13 : Eolienne installée en mer.

Le tableau (II.3) illustre un comparatif simple entre les deux types de fonctionnement.

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicité du système électrique ;</li> <li>• Plus grande fiabilité ;</li> <li>• Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne ;</li> <li>• Moins cher ;</li> <li>• Fonctionnement à vitesse variable (<math>\pm 30\%</math> de la vitesse nominale).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation du rendement énergétique ;</li> <li>• Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;</li> <li>• Réduction des efforts subis par le train de puissance ;</li> <li>• Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.</li> </ul>

**Tableau II. 3** illustre un comparatif simple entre les deux types de fonctionnement.

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Avec la meilleure qualité et la baisse des coûts de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus utilisées. Dans la suite de ce travail, nous ne traiterons que des éoliennes à vitesse variable. En effet l'objectif de cette thèse est d'élaborer des commandes pour la génératrice afin d'augmenter le rendement et la qualité de l'énergie produite. Ce pilotage n'est possible qu'avec une éolienne à vitesse variable.

Trois types de génératrice peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable : la génératrice synchrone, la génératrice asynchrone et la génératrice asynchrone à double alimentation. On donne par la suite les principales caractéristiques de chacun de ces types de machines [8].

## II.7. Aperçu Sur Les Systèmes De Conversion Electromécanique

Trois types de génératrice peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable : la génératrice synchrone, la génératrice asynchrone et la génératrice asynchrone à double alimentation.

### II.7.1 Système Utilisant Une Génératrice Synchrone

#### II.7.1.1. Exploitation dans l'éolien

La caractéristique (couple-vitesse) d'une machine synchrone utilisée en alternateur exige la maîtrise du synchronisme entre les deux forces électromotrices rotorique et statorique, elles doivent tourner à la même vitesse, ce qui pose un problème dans l'intégration de cette machine dans un système de production d'énergie éolienne. Une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau est systématiquement insérée. Dans la

plupart des cas, le stator de l'alternateur est à base des aimants permanents qui sont plutôt coûteux, surtout ceux qui sont à base des terres rares, et risquent de perdre ses caractéristiques magnétiques à cause des fortes variations des couples électromagnétiques.

De plus, le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau (figure II.14). Donc il nous faut des composants de puissances plus performants voire spéciaux.

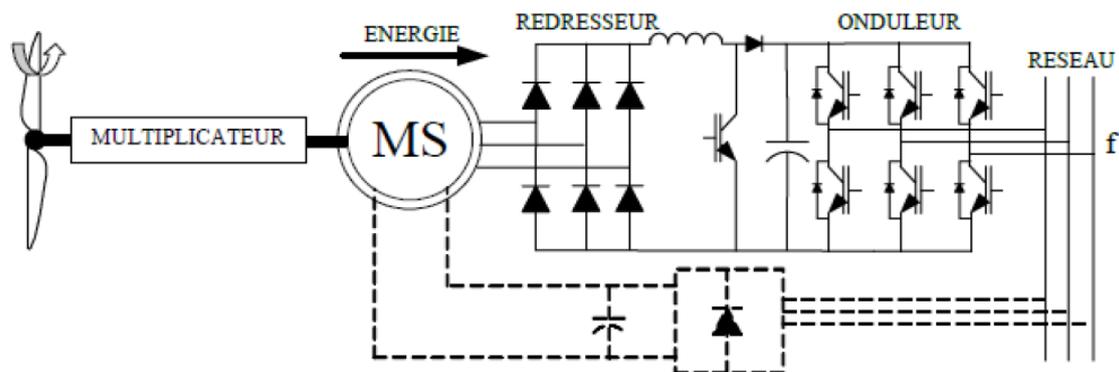


Figure II.14 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne.

L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents. Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées principalement pour les raisons suivantes :

- Prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares).
- Démagnétisation progressive découlant de l'utilisation de ces aimants en présence de champs magnétiques intenses régnant dans le générateur.

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

### II.7.1.2. Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.</li> <li>- Absence de boîte de vitesse.</li> <li>- Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Machine spécifique.</li> <li>- Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.</li> <li>- Grand diamètre de la machine.</li> </ul>

Tableau II.4 résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices synchrones.

## II.7.2 Systèmes Utilisant La Machine Asynchrone

### II.7.2.1. Exploitation dans l'éolien

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant.

Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil on doit travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme (point  $g=0$ )). Le nombre des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%).

Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau (éolienne a vitesse fixe) (Figure II.15). De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau.

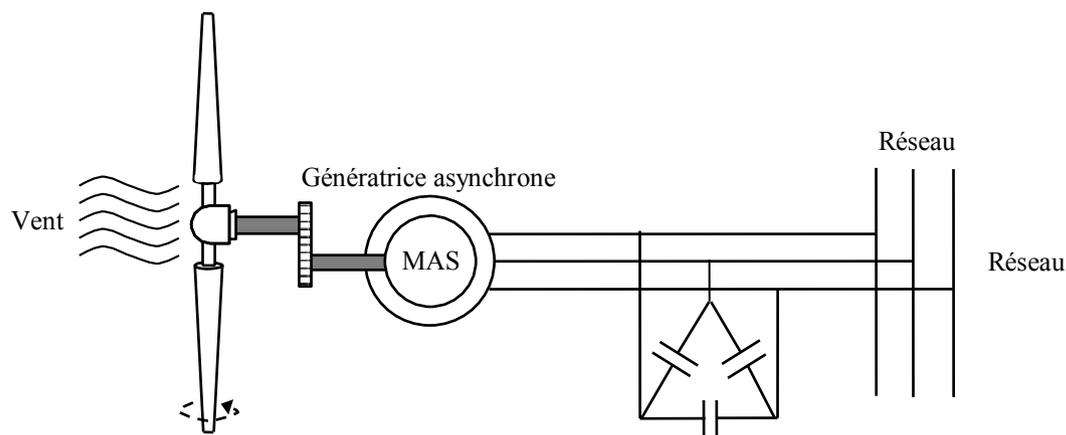


Figure II.15 : machine asynchrone brushless connecté au réseau.

### II.7.2.2. Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	- Electronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.

Tableau II.5 : Avantages et inconvénients des génératrices Asynchrones.

### II.7.3. Systèmes Utilisant la machine asynchrone à double alimentation

#### II.7.3.1. Exploitation dans l'éolien

La MADA a trouvée la voie libre pour s'émerger en puissance dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau (Avec un système de protection évidement) et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique.

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux (figure II.16).

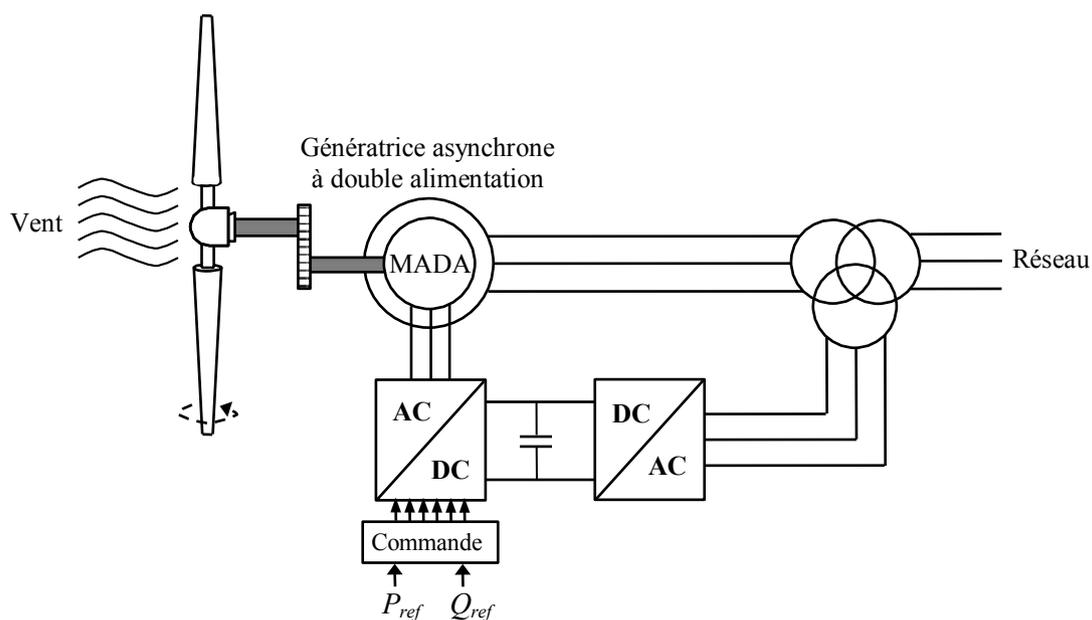


Figure II.16 : Eolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

#### II.7.3.2. Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens</li> <li>- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale ;</li> <li>- Fonctionnement à vitesse variable (<math>\pm 30\%</math> de vitesse nominale).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenance du multiplicateur ;</li> <li>- Commande complexe ;</li> <li>- Oscillations mécaniques.</li> </ul>

Tableau II.6 : Avantages et inconvénients de la génératrice asynchrone double alimentation.

## II.8. Modèle de la turbine éolienne

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système de l'aérogénérateur éolien. Le dispositif, est constitué d'une turbine éolienne tripale de longueur  $R$  entraînant une génératrice couplée à l'arbre d'un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ . (figure (II.17)).

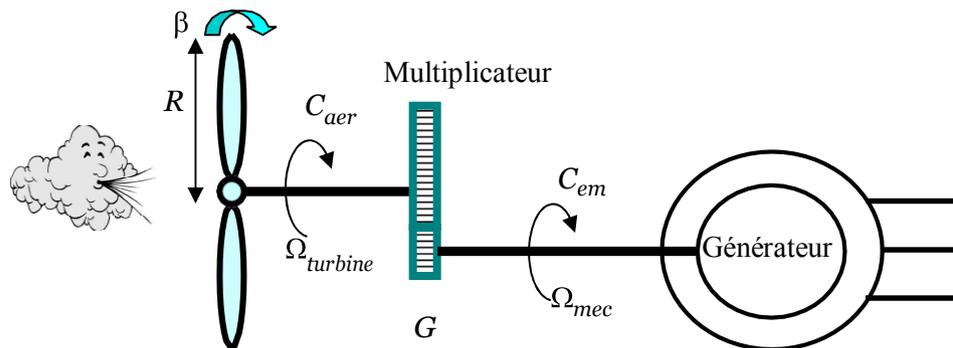


Figure II.17 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

### II.8.1. Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser la turbine, nous nous appuyerons sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont le plus couramment considérées. Ainsi nous supposerons que :

- ✓ Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air.
- ✓ Les trois pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support.
- ✓ La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales.
- ✓ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable.
- ✓ Les pertes par frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

### II.8.2. Modèle aérodynamique

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par [33]:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.1})$$

Où :  $\rho$  Est la densité de l'air (approx.  $1,22 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ )

$S$  est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ;

$V_v$  : est la vitesse du vent.

Selon la loi de Betz (voir annexe A), cette puissance ne pourra jamais être extraire dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz

$$P_{aer} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0,59 \cdot P_v \quad (\text{II.2})$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon, le coefficient de puissance maximal théorique est défini comme suit :

$$C_P^{opt} = \frac{P_{aer}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{aer}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} = 0,59 \quad (\text{II.3})$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (\text{II.4})$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée dite vitesse relative  $\lambda$ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{II.5})$$

Où  $\Omega_t$  est la vitesse de la turbine.

Dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et de l'angle de calage des pales  $\beta$  dont l'expression a pour origine les travaux d'El Aimani [46] :

$$C_p = (0.5 - 0.167)(\beta - 2) \sin \left[ \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.0018 (\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II.6})$$

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique  $C_t$  disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2 \cdot \Omega_t} \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.7})$$

### II.8.3. Modèle du multiplicateur de vitesse

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

$$\begin{cases} C_g = \frac{C_t}{G} \\ \Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

### II.8.4. Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_{turbine}$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, nous pouvons modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constituée de deux masses (figure (II.18), [47]).

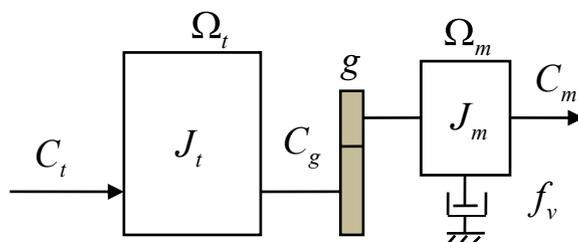


Figure II.18 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

$J_{turbine}$  : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.

$J_g$  : Le moment d'inertie de la GADA.

$f_v$  : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA.

$C_g$  : Le couple mécanique sur l'arbre de la GADA.

$\Omega_g$  : La vitesse de rotation de la GADA.

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J_T$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J_T = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J \quad (II.9)$$

Il est noté que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne « Vestas » de 2 MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [48].

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor :

$$J_T \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.10)$$

Où :  $J_T$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{mec}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice  $C_g$ .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.11)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux

$f_{vis}$  :

$$C_{vis} = f_{vis} \cdot \Omega_{mec} \quad (II.12)$$

Le schéma bloc de la figure (II.19) montre que la turbine produite un couple aérodynamique  $C_{aer}$  à partir de la puissance cinétique  $P_v$  du vent et par action de l'angle d'orientation des pales  $B$ . Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique  $C_{aer}$  de la turbine en couple du multiplicateur  $C_g$ , et en même temps, il transforme la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$  en vitesse de la turbine  $\Omega_{turbine}$ .

Le schéma bloc, nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur l'angle de calage des pales  $B$  et sur le couple électromagnétique de la génératrice  $C_{em}$ . La vitesse du vent  $V$  est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

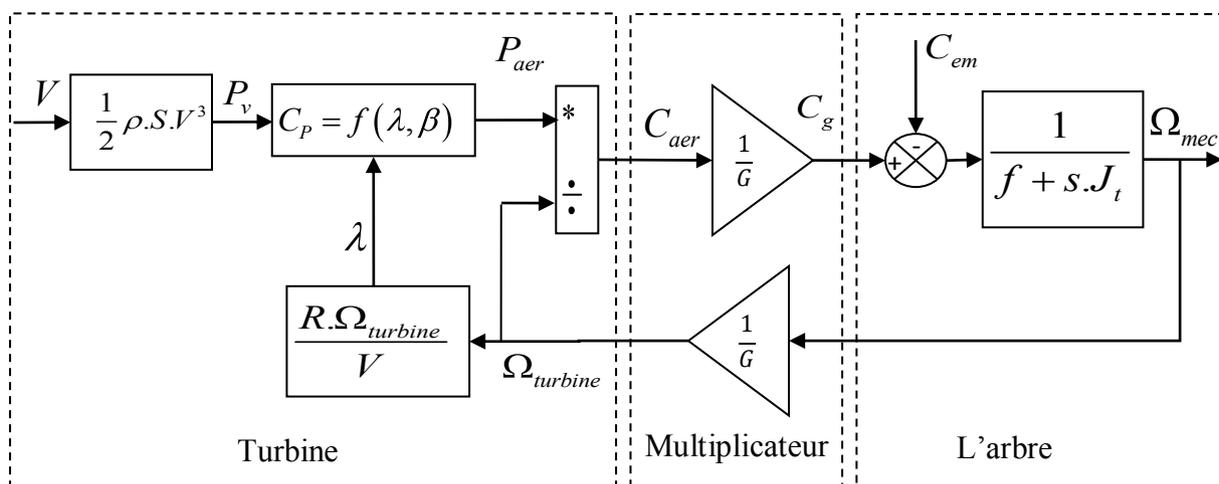


Figure II.19: Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne.

## II.9. Stratégie de commande de la turbine éolienne

### II.9.1. Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance

La caractéristique puissance vitesse d'une éolienne est décomposée en trois zones, figure (II.20).

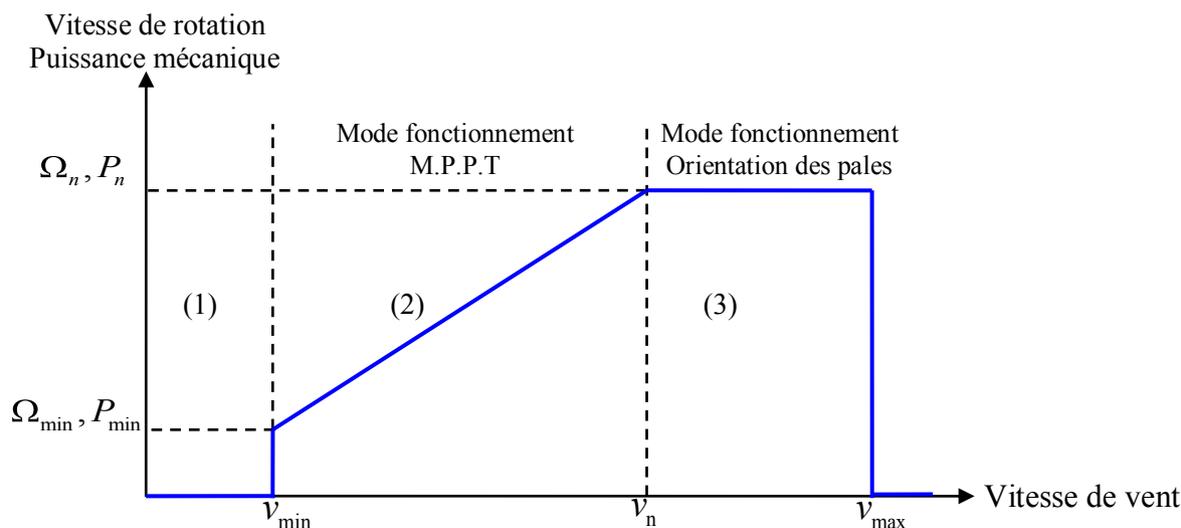


Figure II.20 : Caractéristique puissance vitesse.

Nous pouvons distinguer trois principales zones de fonctionnement :

- **Zone (1)** : zone de démarrage de la machine ou la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit pas d'énergie ( $P_{Turbine} = 0$ ) ;

- **Zone (2)** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V$ . ou généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et ou la puissance  $P_{Turbine}$  fournie reste sensiblement égale à  $P_n$ .
- **Zone 3** : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie, lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne. Il faut donc limiter la puissance captée par l'aérogénérateur lorsque le vent devient trop important, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales  $\beta$ ). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale  $V_{max}$ .

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales  $\beta$  est constant. Un fonctionnement en zone 3 aurait uniquement pour conséquence une modification de cet angle afin de limiter la puissance mécanique pour éviter toute destruction de l'éolienne.

Nous constatons dans le schéma bloc de la figure (II.21) que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées: l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système, de nature très fluctuante.

Le couple électromagnétique nous permet de réaliser un contrôle de la vitesse de rotation afin de maintenir le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne à une valeur proche de sa valeur optimale  $\lambda_{C_p-max}$  max l figure (II.21). Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du coefficient de puissance). En contrôlant ainsi la vitesse de rotation, nous optimisons la conversion énergétique car le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale  $\lambda_{C_p-max}$ .

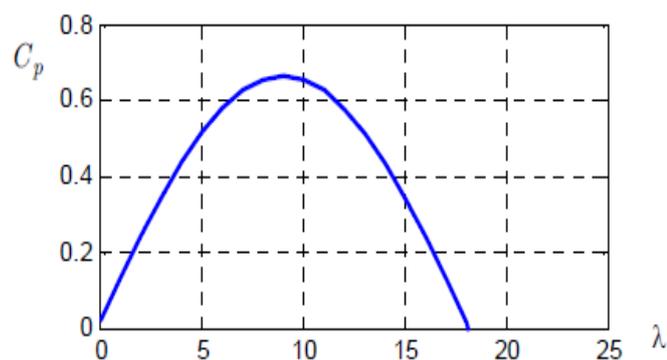


Figure II.21 : Courbe caractéristique retenue de  $C_p$  pour notre étude.

Au moment actuel, les stratégies adoptées visent à extraire le maximum de puissance du vent. Cette puissance est extraite lorsque la turbine fonctionne au coefficient de puissance maximale. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation du vent, pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance [49]. Dans notre travail, nous représentons deux stratégies de maximisation de la puissance :

- Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse mécanique.
- Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse mécanique.

### II.9.2. Calcul du couple de référence

Le vent est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante. La figure (II.22) montre clairement que les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, nous supposons que la machine électrique et son variateur sont idéaux, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé par la GADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

$$C_{em} = C_{em}^* \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$C_{em}^*$  Le couple électromagnétique de référence de la GADA

### II.9.3. Commande de la vitesse de la turbine sans mesure de vitesse du vent

En réalité, les mesures du vent prises ne sont pas satisfaisantes et imprécises lors d'une sensible variation de ce dernier. Vu que, la plupart des dispositifs de mesures se situent derrière le rotor de la turbine avec un diamètre de la surface balayée par ses pales étant importante. Parfois l'utilisation d'un seul dispositif (anémomètre) qui conduit par une mesure local, donc non suffisante. Par conséquent, une lecture erronée de la vitesse dégrade la puissance captée.

En effet, il est préférable d'utiliser un contrôle qui ne nécessite pas une mesure de la vitesse du vent, autrement dit sans asservissement de la vitesse [35], [46]. Nous présenterons dans cette section la stratégie de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent.

Cette structure est basée sur l'hypothèse que la variation de la vitesse du vent est négligeable dans le régime permanent, donc la vitesse de rotation est fixe pendant cette durée. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, nous obtenons l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$\left( \frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_g}{dt} + f_v \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} = 0 \quad (\text{II.23})$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ( $f_v \cdot \Omega_g = 0$ ) par rapport au couple mécanique  $C_g$ , on peut alors écrire :

$$C_g = C_{em} \quad (\text{II.24})$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée  $\hat{\Omega}_t$ , est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la GADA :

$$\hat{\Omega}_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{II.25})$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée  $\hat{V}_v$ , est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse rotation de la turbine :

$$\hat{V}_v = \frac{\hat{\Omega}_t \cdot R}{\lambda} \quad (\text{II.26})$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$\hat{C}_t = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\Omega}_t} \cdot \hat{V}_v^3 \quad (\text{II.27})$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$C_{em}^* = \frac{\hat{C}_t}{G} \quad (\text{II.28})$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  afin d'obtenir le coefficient de puissance maximum  $C_{p_{max}}$ . Le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par :

Où  $\Gamma$  est une constante définie par

$$C_{em}^* = \frac{C_{p_{max}} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \quad (\text{II.29})$$

La figure (II.22) présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

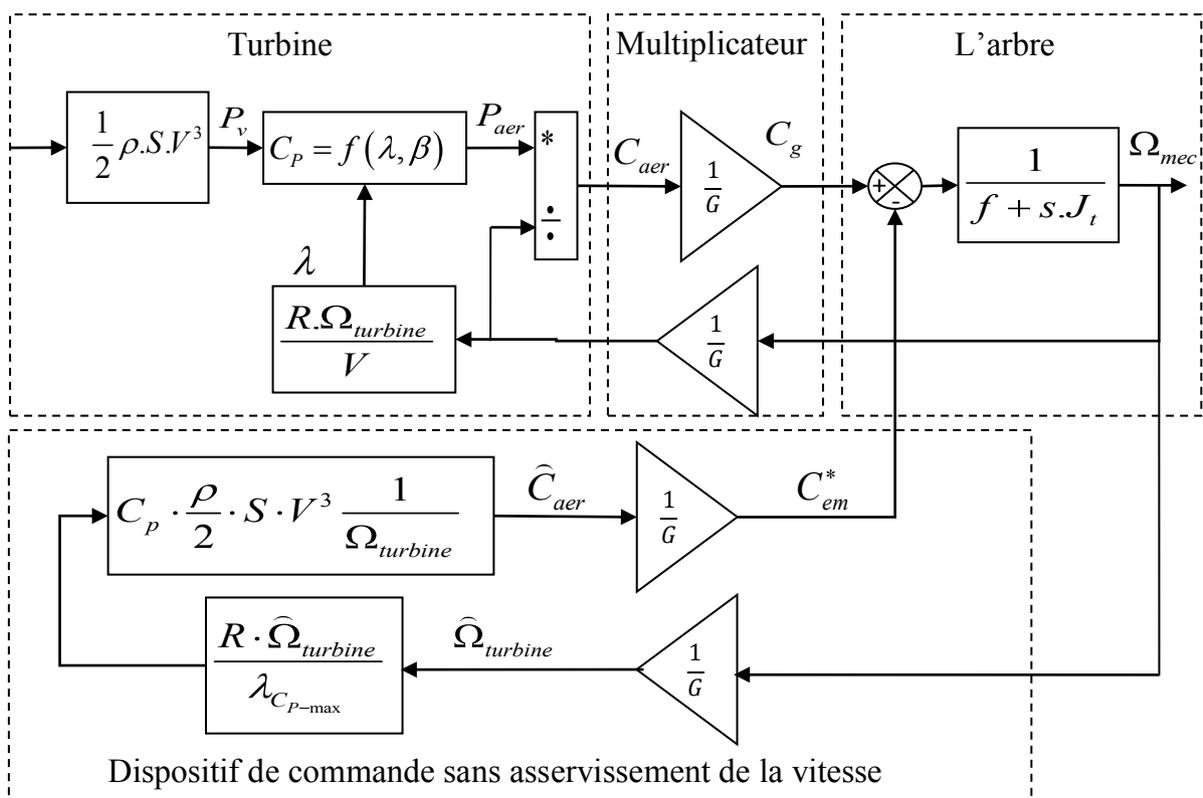


Figure II.22 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

#### II.9.4. Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés. Comme expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$

$$\frac{d\Omega_g}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - f_v \cdot \Omega_g - C_{em}) \quad (II.14)$$

Où  $J$  est l'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice », donnée par

$$J = \left( \frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \quad (II.15)$$

Finalement, nous pouvons déduire une structure adéquate de commande qui consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence.

Pour l'application de cette structure de commande nous devons asservir la vitesse. La relation montre que pour avoir un couple de référence il faut avoir une vitesse mécanique de référence, qui dépend de la vitesse de la turbine à fixer, donc nous devons prendre en compte le gain du multiplicateur.

Le couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $\Omega_g^*$  est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em}^* = R_{\Omega}(\Omega_g^* - \Omega_t) \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$R_{\Omega}$  Le régulateur de vitesse ;

$\Omega_g^*$  La vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer  $\Omega_t^*$  pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, nous avons donc :

$$\Omega_g^* = G.\Omega_t^* \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$\Omega_t^*$  : a vitesse de référence de la turbine.

Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient  $C_p$ . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative  $\lambda$  est égale à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  (pour  $\beta$  constant et égal à  $2^\circ$ ).

La vitesse de rotation de référence de la turbine  $\Omega_t^*$  est obtenue à partir de l'équation (II.18) comme suit :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (\text{II.18})$$

Le couple électromagnétique de référence  $C_g^*$  permettant d'avoir une vitesse de rotation  $\Omega_g$  égale à sa valeur de référence  $\Omega_g^*$  obtenue en sortie du régulateur de vitesse. Des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI), Mode Glissant(MG), permettent ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple de la MADA  $C_g$  considéré comme une perturbation.

Dans ce travail, trois types d'asservissement sont envisagées pour égaler la vitesse mécanique à la consigne qui est fonction de la vitesse du vent.

- ✓ une régulation basée sur une loi linéaire de type PI (voir la synthèse dans l'annexe B)
- ✓ une régulation basée sur la technique non linéaire par mode glissant. (Voir la synthèse dans chapitre II)

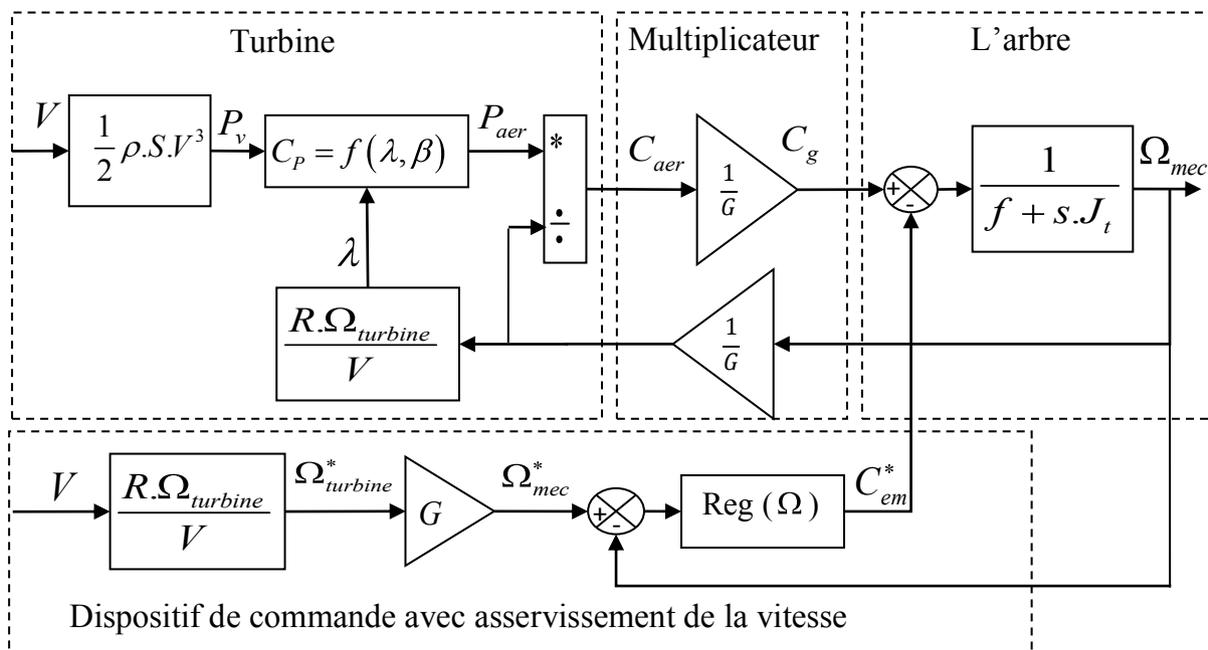


Figure II.23 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

### II.10. Résultats de simulation

Les deux structures de commande MPPT étudiées auparavant ont été simulées par le logiciel Matlab/Simulink, en considérant un profil du vent illustré par la figure (II.24).

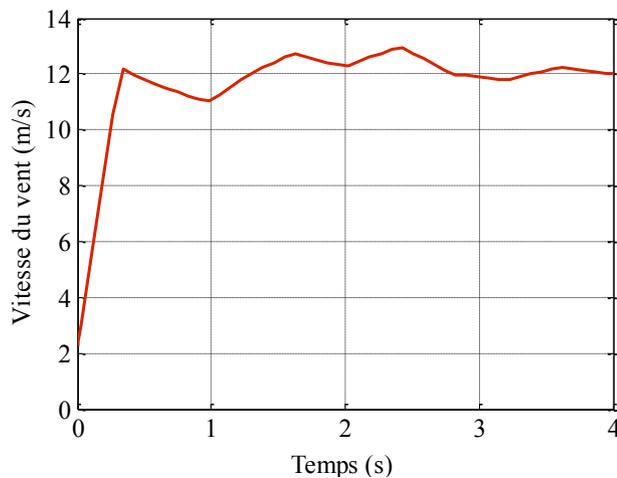


Figure II. 24 : Profil du vent appliqué.

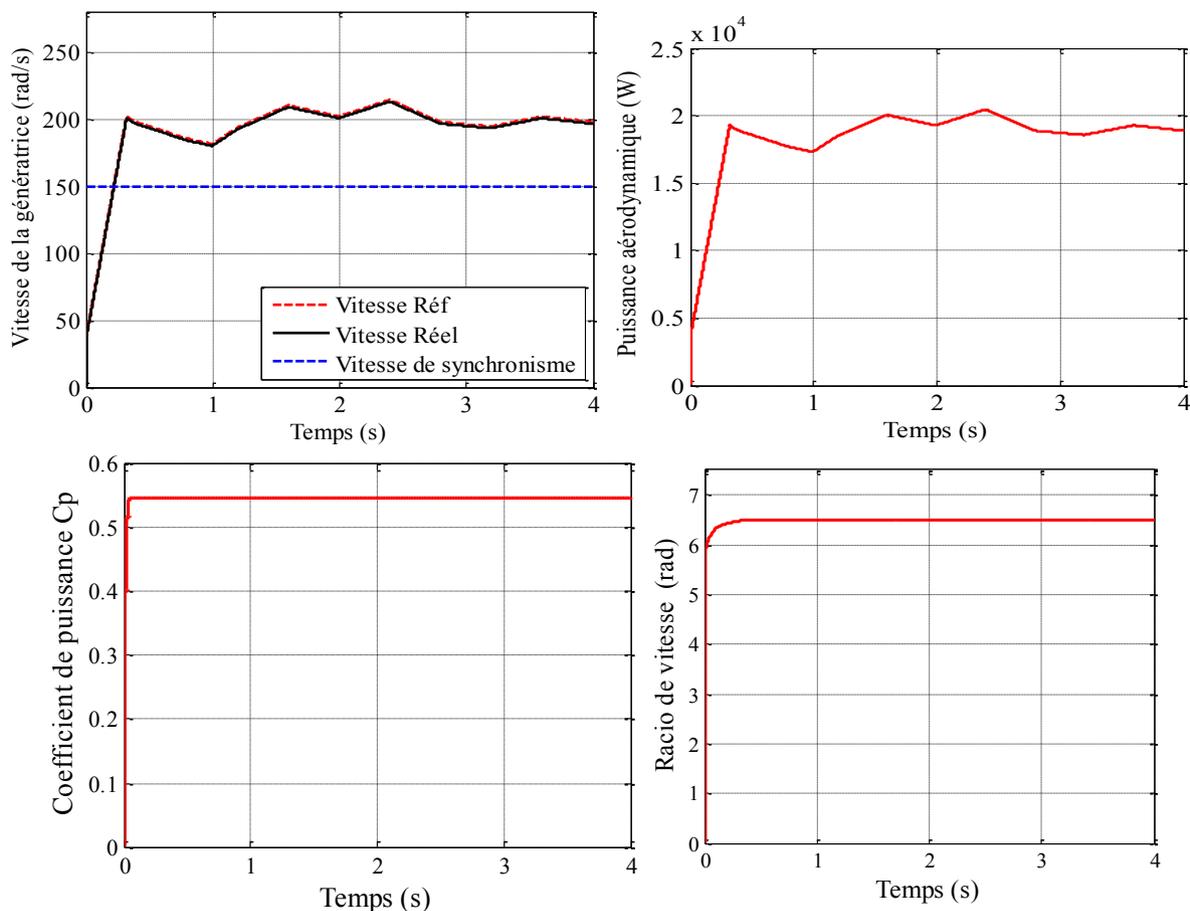


Figure II. 25 : Résultats de la commande MPPT avec asservissement de vitesse par PI classique.

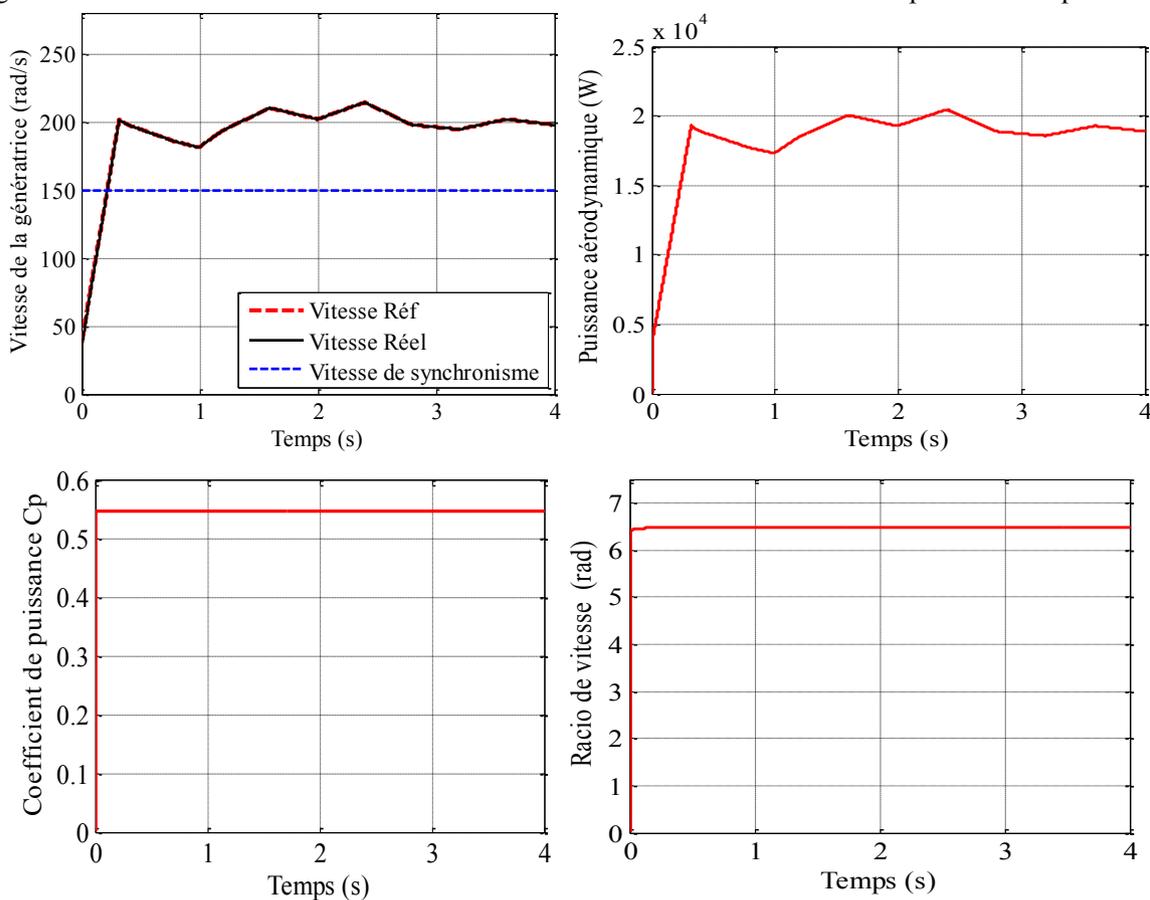


Figure II. 26 : Résultats de la commande MPPT avec asservissement de vitesse par MG.

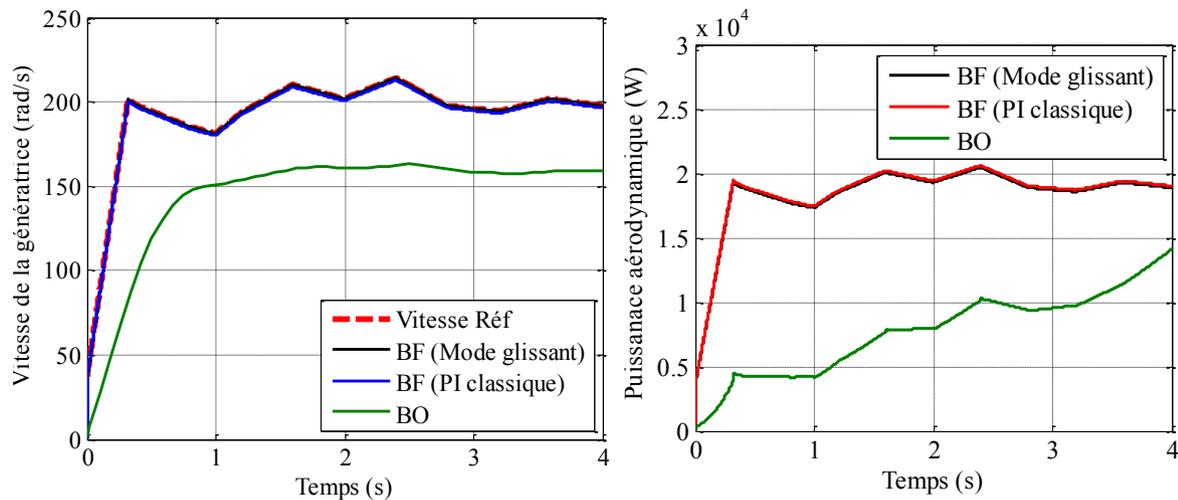


Figure II.27 : Les résultats du MPPT obtenus avec les deux stratégies.

Les figures (II.25), (II.26), montrent les résultats obtenus du control avec asservissement de la vitesse mécanique pour les trois contrôleurs. Ce qui concerne le coefficient de puissance  $C_p$ , pour les trois stratégies de commande étudiées, ce coefficient prend une valeur maximale de 0,48 pour un angle de calage  $=0^\circ$ . Le maximum de puissance est obtenu sans dépassement, cependant on peut remarquer que la consigne est suivie de manière identique en régime transitoire et permanent, malgré de légères fluctuations.

Ce contrôle est très dynamique et la puissance aérodynamique obtenue en régime transitoire est donc plus importante. Le coefficient de puissance et le rapport de vitesse sont ajustés à leurs valeurs optimales. Les résultats obtenus montrent les meilleures performances statiques et dynamiques, meilleurs poursuite de la consigne contrôlée (vitesse) et un temps de réponse souhaitable offertes par les deux régulateurs. Afin de résumer ces résultats obtenus avec l'une ou l'autre stratégie de contrôle de vitesse (MPPT), les figures (II.27) et montrent la vitesse mécanique ainsi que sa référence avec les deux régulateurs (B.F) et celle de la stratégie sans asservissement (B.O).

## II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la commande de la turbine d'un système éolien. En premier lieu, nous avons modélisé l'ensemble de la partie mécanique incluant les pales, le multiplicateur et l'arbre du rotor. Ensuite, nous avons présenté une stratégie de commande afin de maximiser la puissance extraite du vent. C'est la MPPT (Maximum Power Point Tracking). Dans le prochain chapitre, nous allons nous intéresser à la partie électrique du système éolien. Cette partie est constituée d'une machine asynchrone à double alimentation.

---

---

# **Chapitre III**

## **Commande vectorielle de la GADA**

---

---

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons découvrir un type de machines à induction qui est la Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA » (en anglais Doubly-Fed Induction Machine « DFIM »), à rotor bobiné. Cette machine présente un stator triphasé analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrones à cage ou synchrones) et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible via des collecteurs et permet une connexion externe des bobinages rotoriques. Cette connexion est une liaison d'alimentation externe qui permet de réaliser un contrôle des grandeurs rotoriques [47].

L'intérêt majeur de la MADA se situe dans les applications nécessitant une vitesse variable, en mode moteur ou générateur ; comme pour la production de l'électricité à partir des aérogénérateurs fonctionnant à vitesse de vent variable. Nous allons décrire à travers les concepts physiques de base régissant le fonctionnement de tout type de MADA. On commencera par décrire globalement son principe de fonctionnement, on développera les relations qui existent entre les grandeurs de contrôle accessibles au stator et au rotor comme les tensions, les courants, le couple électromagnétique, la vitesse et le facteur de puissance...etc. La MADA offre un avantage de fonctionnement en mode moteur (hypo et hyper synchrone) et générateur (hypo et hyper synchrone).

Dans ce chapitre, nous débuterons notre étude par la présentation des différentes technologies de la GADA avec leurs dispositifs d'alimentation. Nous exposerons par la suite, les modèles de la GADA et les convertisseurs de puissances associés. Enfin, on terminera le chapitre par la commande vectorielle de cette génératrice.

### III.2. Notions sur machine asynchrone à double alimentation

#### III.2.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine à double alimentation en anglo-saxon « *doubly-fed induction machine* (DFIM) » est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, pour laquelle la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements. Ce type de machines nécessite deux sources d'alimentation. Ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction. Cependant, cette structure est plus coûteuse [50].

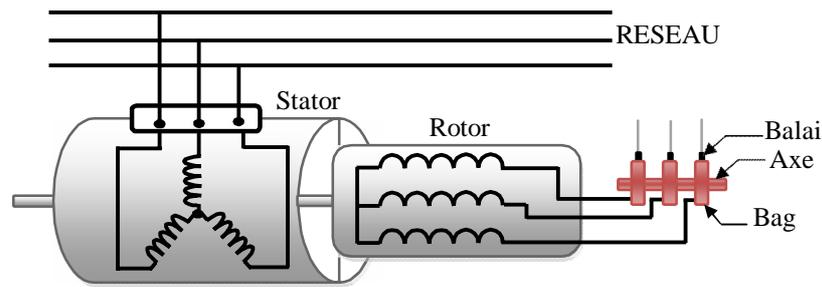


Figure III.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

On peut voir sur la figure (III.1) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.

### III.2.2. Fonctionnement de la GADA dans un système éolien

Le système éolien à vitesse variable basé sur une MADA est illustré sur la figure (III.2). La turbine, via un multiplicateur, entraîne la MADA, laquelle est raccordée directement au réseau électrique par le stator et également au travers de convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par un rotor muni de systèmes bagues/balais.

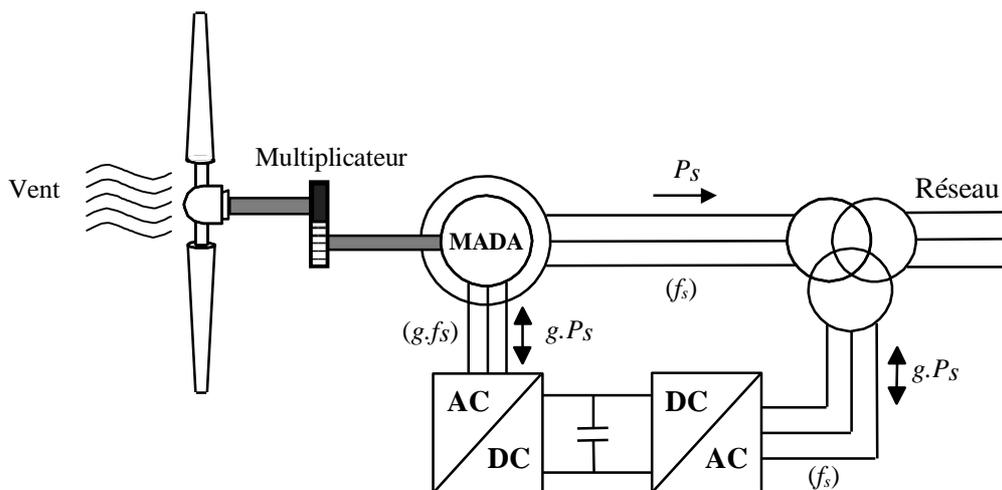


Figure III.2 : Schéma synoptique du modèle et d'une commande de la chaîne de conversion étudiée

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance  $P_s$  est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie,  $(1 - g)P_s$ , est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste,  $g P_s$  sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence  $g f_s$ . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce

réseau reçoit donc  $(1 + g)P_s$  [34]. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs. Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (f.e.m) dans les enroulements rotoriques.

### III.2.3. Modes de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au dessus de celle-ci. Par contre, la MADA. Offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants, C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur.

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe de la commande de la MADA en ces modes peut être compris à travers la figure (III.3). Dans cette dernière,  $P_r$  et  $P_{mec}$  désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique [51]. En négligeant les pertes, on peut généraliser le transfert des puissances montré dans la figure (III.3) comme suit :

$$P_r = g.P_s \quad (III.1)$$

$$P_{réf} = P_{mec} = P_s - P_r = (1 - g).P_s \quad (III.2)$$

Moteur ( $P_{mec} > 0$ )	Générateur ( $P_{mec} < 0$ )
<p><b>hypo-synchrone <math>g &gt; 0</math></b></p> <p><math>P_s &gt; 0</math></p> <p><math>P_r &gt; 0</math></p> <p><math>P_s &gt; P_{rés}</math></p>	<p><b>hypo-synchrone <math>g &gt; 0</math></b></p> <p><math>P_s &lt; 0</math></p> <p><math>P_r &lt; 0</math></p> <p><math>P_s &gt; P_{rés}</math></p>
<p><b>hyper-synchrone <math>g &lt; 0</math></b></p> <p><math>P_s &gt; 0</math></p> <p><math>P_r &lt; 0</math></p> <p><math>P_s &lt; P_{rés}</math></p>	<p><b>hyper-synchrone <math>g &lt; 0</math></b></p> <p><math>P_s &lt; 0</math></p> <p><math>P_r &gt; 0</math></p> <p><math>P_s &lt; P_{rés}</math></p>

Tableau. III.1 : Quadrants de fonctionnement de la MADA

### a) Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [35]

La figure (III.3.a) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

### b) Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone [52]

La figure (III.3.b) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme.

### c) Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone [35]

Lors du fonctionnement de la MADA en moteur, la puissance  $P_s$  est fournie par le réseau au stator. Durant le mode hypo-synchrone, où la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée vers le réseau figure (III.3.c).

### d) Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone [35]

Pendant le mode hyper-synchrone, le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA. Une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique figure (III.3.d).

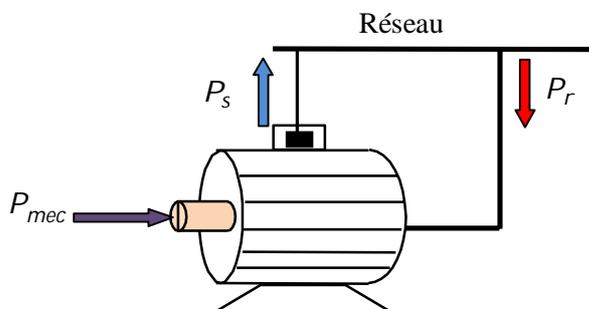


Figure III.3.a : Fonctionnement génératrice hypo-synchrone.

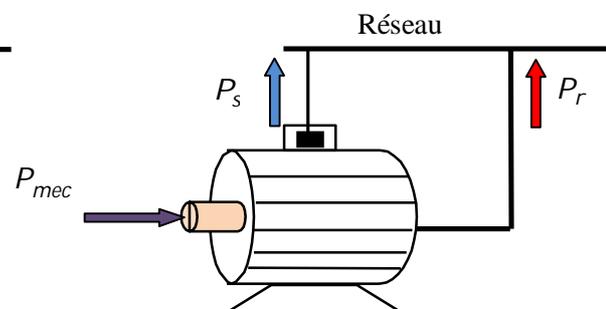


Figure III.3.b : Fonctionnement génératrice hyper-synchrone.

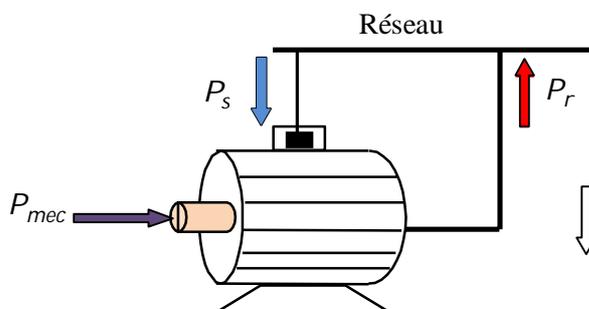


Figure III.3.c : Fonctionnement moteur hypo-synchrone.

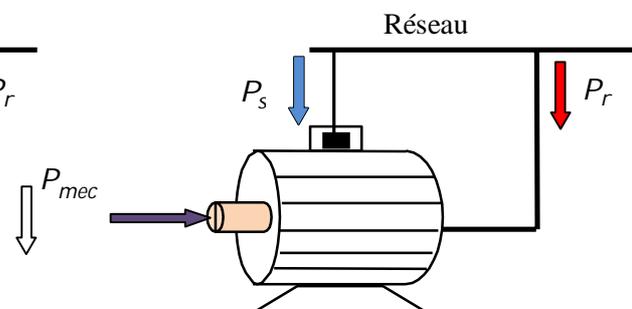


Figure III.3.d : Fonctionnement moteur hyper-synchrone.

Figure III.3 : Modes de fonctionnement de la MADA.

### **III.2.4. Intérêt de la MADA**

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable, même à faibles vitesses. Le système à base de la MADA peut fonctionner pour toutes les vitesses de rotation du rotor, en fonction de la vitesse du vent. En effet, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo-synchrone et hyper-synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible [53].

### **III.3. Etat de l'Art sur les éoliennes à base d'une machine asynchrone à double alimentation**

#### **III.3.1. Différentes structures d'un système éolien à base d'une MADA**

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Comme la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère bien choisi. Parmi les configurations les plus citées :

##### **III.3.1.1. Applications moteur**

Lorsque la variation de la vitesse des machines à induction classiques s'impose, l'utilisation d'une MADA offre l'avantage de réduire la taille de ces convertisseurs de la fréquence d'environ 70%, en agissant sur l'alimentation des enroulements rotoriques ; contrairement aux machines synchrones ou asynchrones qui nécessitent pour la variation de la fréquence des courants statoriques des convertisseurs qui seront dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance nominale de la machine [54].

Ce dispositif est par conséquent économique et, à la place de n'être qu'un consommateur de puissance réactive contrairement à la machine asynchrone à cage, il peut en être un fournisseur.

Ces qualités font de la MADA une machine qui peut être utilisée dans plusieurs applications industrielles, on peut citer :

- ❖ L'industrie de la métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.

- ❖ La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- ❖ Les applications de levage, ascenseurs, monte-charge, ...etc.

Parmi les configurations les plus utilisées en mode moteur, et selon le mode de fonctionnement :

### III.3.1.1.1. MADA simple

Les enroulements statoriques sont connectés directement au réseau triphasé fixe, tandis que le rotor est relié au réseau à travers un onduleur avec un transformateur (figure (III.4)).

Ce mode d'alimentation n'est pas adapté au fonctionnement à faibles fréquences rotoriques ; néanmoins l'alimentation du rotor à travers un onduleur dimensionné à seulement 30% de la puissance mécanique maximale, permet de compenser problème [55].

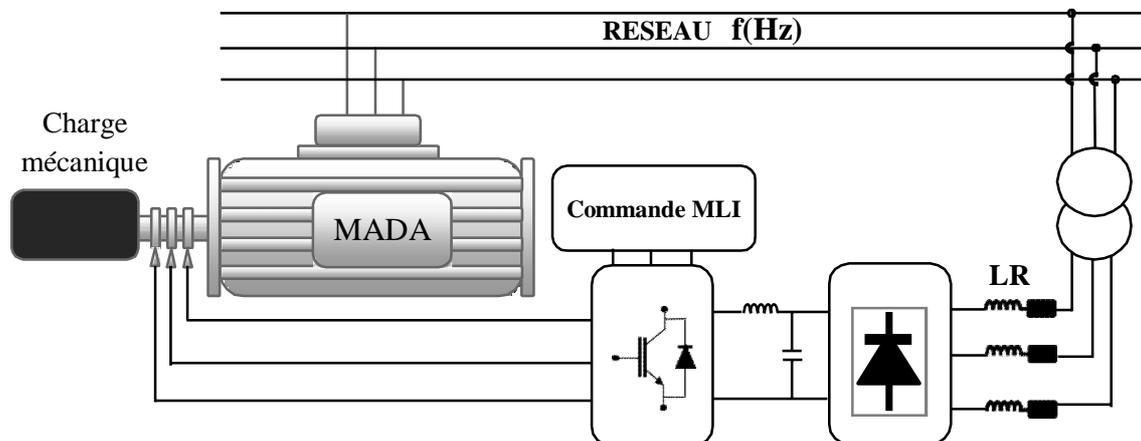


Figure III.4 : Configuration d'une MADA simple.

### III.3.1.1.2. MADA à rotor alimenté par un Cyclo-convertisseur

Le remplacement de l'association redresseur-onduleur par un cyclo-convertisseur autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau (figure (III.5)).

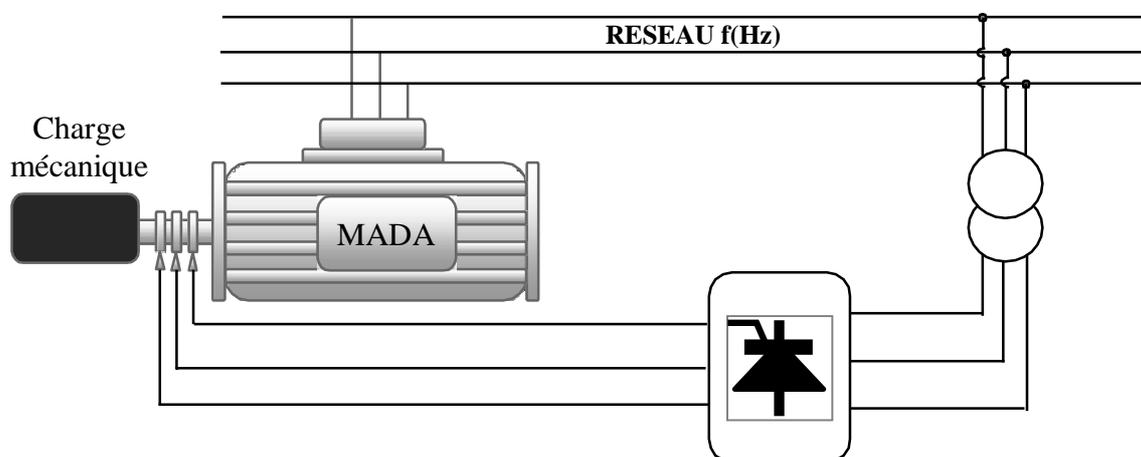


Figure III.5 : MADA avec rotor alimenté par un cyclo-convertisseur.

Le principe du cyclo-convertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo-convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés [56].

### III.3.1.1.3. MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants

Grâce à ce type d'alimentation, la MADA possède quatre degrés de libertés ce qui rend son contrôle très souple. Tous les paramètres de la MADA peuvent être réglés (Vitesse ou couple) (figure (III.6)).

Flux statorique, rotorique et d'entrefer, Glissement et Facteur de puissance) [57].

Dans cette structure on trouve plusieurs configurations possibles. Le stator et le rotor sont alimentés soit :

- ❖ Deux cyclo-convertisseurs.
- ❖ Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs.
- ❖ Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

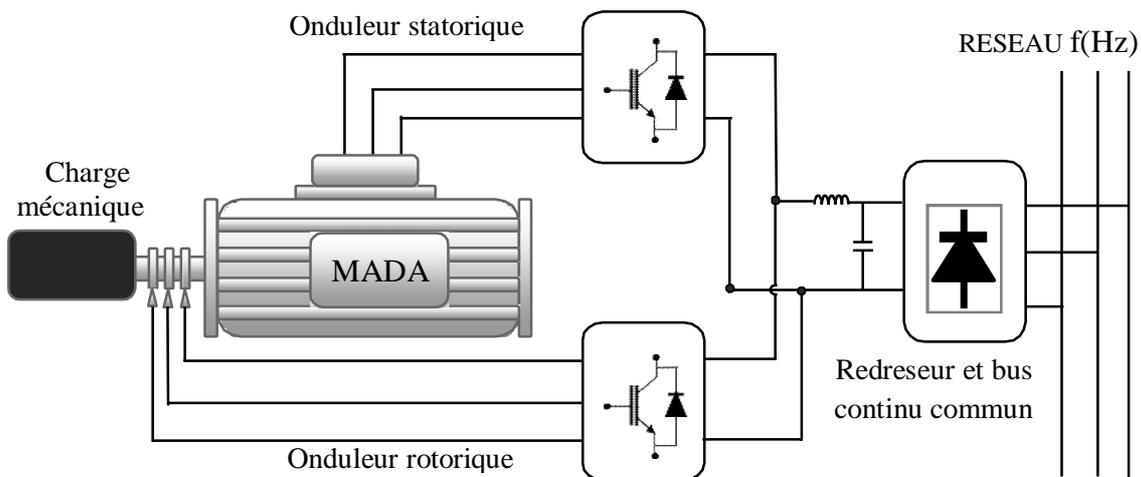


Figure III.6 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cyclo-convertisseurs [57].

### III.3.1.2. Applications génératrice

En mode génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tels que :

- ❖ Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- ❖ Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.

- ❖ Les éoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- ❖ Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

### III.3.1.2.1. MADA à énergie rotorique dissipée

Le stator est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur. L'ajout d'un hacheur à base d'IGBT permet de varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la MADA. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [58].

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système (figure (III.7)).

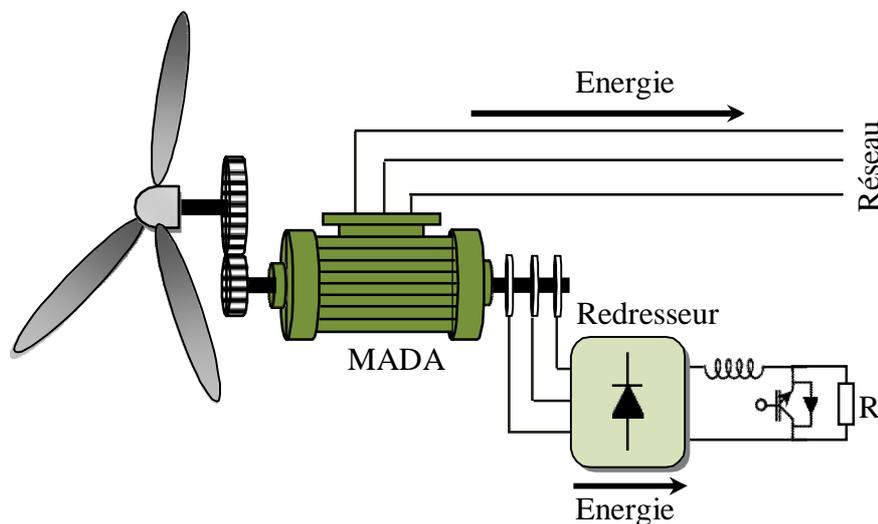


Figure III.7 : MADA à énergie rotorique dissipée.

### III.3.1.2.2. Structure de Kramer

Pour restituer l'énergie dissipée dans la résistance du montage précédent, et réduire ainsi les pertes ; on remplace tout le système par un onduleur constitué par un pont à diodes et un pont à thyristors. L'énergie de glissement est ainsi renvoyée vers le réseau. Cette structure est appelée montage Kramer, elle permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la MADA (figure (III.8)).

Toutefois, l'utilisation de thyristor dans l'onduleur nuit au facteur de puissance, et l'onduleur utilisé va injecter des courants harmoniques à basses fréquences d'amplitude importante. Cette injection d'harmoniques multiples de 50Hz est fatale aux appareillages électriques raccordés sur le réseau.

Au vu de la conception de l'onduleur, on s'aperçoit que le redresseur est unidirectionnel, le transfert d'énergie se fera uniquement du rotor de la MADA vers le réseau ; en conséquence cette structure ne permettra pas l'asservissement électrique de la vitesse de la MADA, elle ne pourra produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper synchrone).

Pour atténuer les harmoniques on remplace les thyristors par des transistors de puissance. L'onduleur est commandé par la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevé, les courants harmoniques à basses fréquences seront pratiquement éliminés. Cette structure a l'avantage de contrôler le flux de puissance réactive ; par contre, elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la MADA, étant donné le caractère unidirectionnel de l'onduleur.

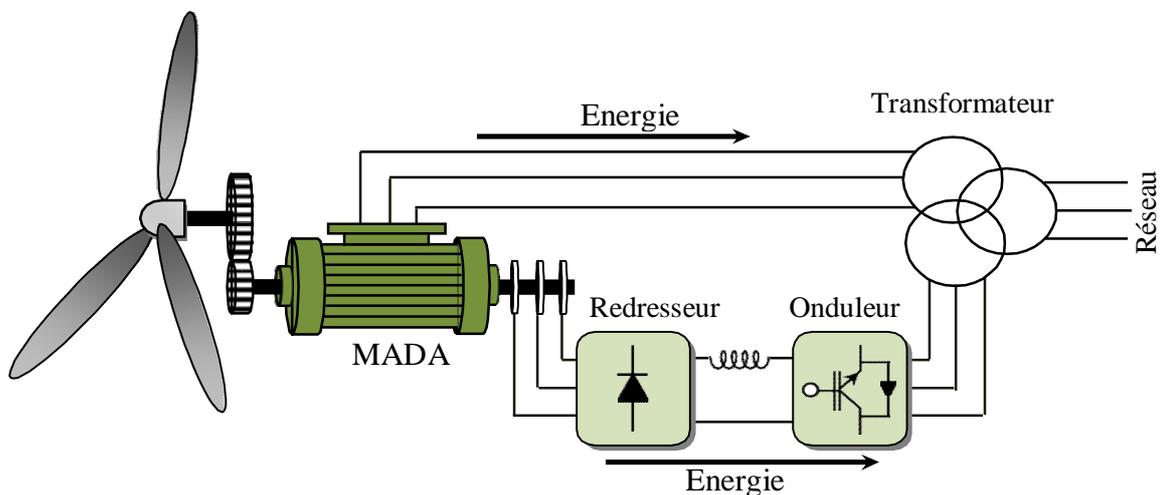


Figure III.8 : MADA à structure de Kramer.

### III.3.1.2.3. MADA à structure de Scherbius (cyclo-convertisseur)

Pour rendre la structure précédente réversible, et autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, on remplace l'association redresseur-onduleur par un cyclo-convertisseur ; qui est réalisé avec des interrupteurs bidirectionnels et bi-commandables (à base de thyristors). Cette structure, est appelée structure de Scherbius, La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure (III.9) En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

L'inconvénient de cette structure est la génération des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif [36]. Les progrès de

l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo-convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) commandés en MLI [58].

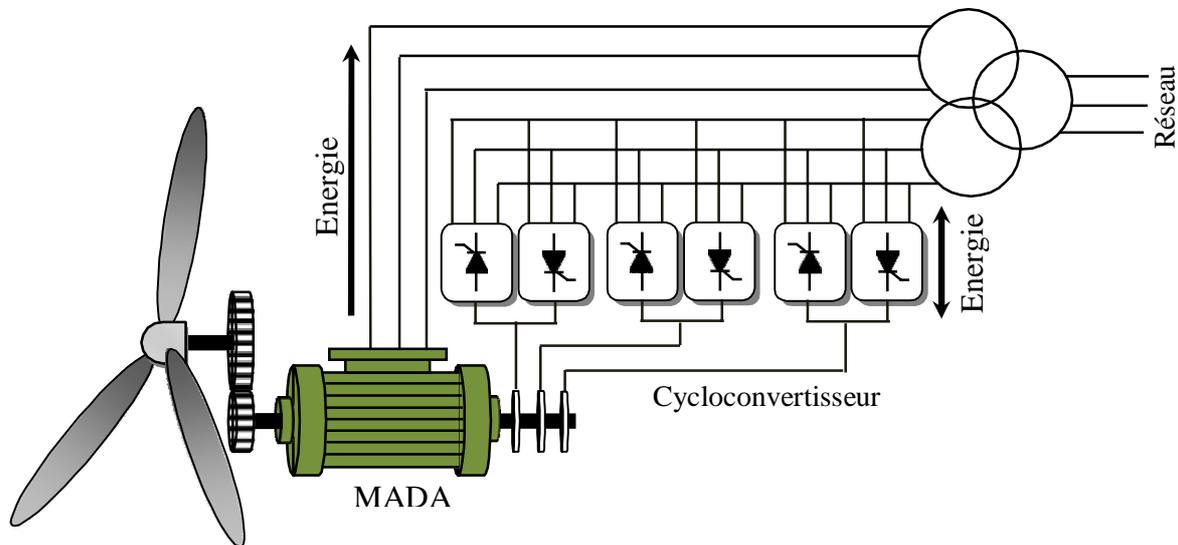


Figure III.9 : MADA à structure Scherbius .

#### III.3.1.2.4. MADA à structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Les interrupteurs utilisés dans la configuration du cycloconvertisseur (**GTO** : **G**ate **T**urn-**O**ff **T**hystor) sont remplacés par des transistors **IGBT**( **I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor) ;ces derniers sont commandables à l'ouverture et à la fermeture et ont une fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées) [36] [56].

Cette structure permet à la fois de contrôler le flux magnétique et la vitesse de la MADA (figure (III.10)), elle offre aussi un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau [59].

Les avantages de cette cascade de convertisseurs sont les suivants :

- ✓ Le flux d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hypo et hyper-synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.
- ✓ Il y a une faible distorsion des tensions et courants statoriques et rotoriques ;

- ✓ Pour un glissement inférieur à  $\pm 30\%$  autour du synchronisme, le convertisseur peut être dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance ;
- ✓ Le fonctionnement hypersynchrone permet d'injecter de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

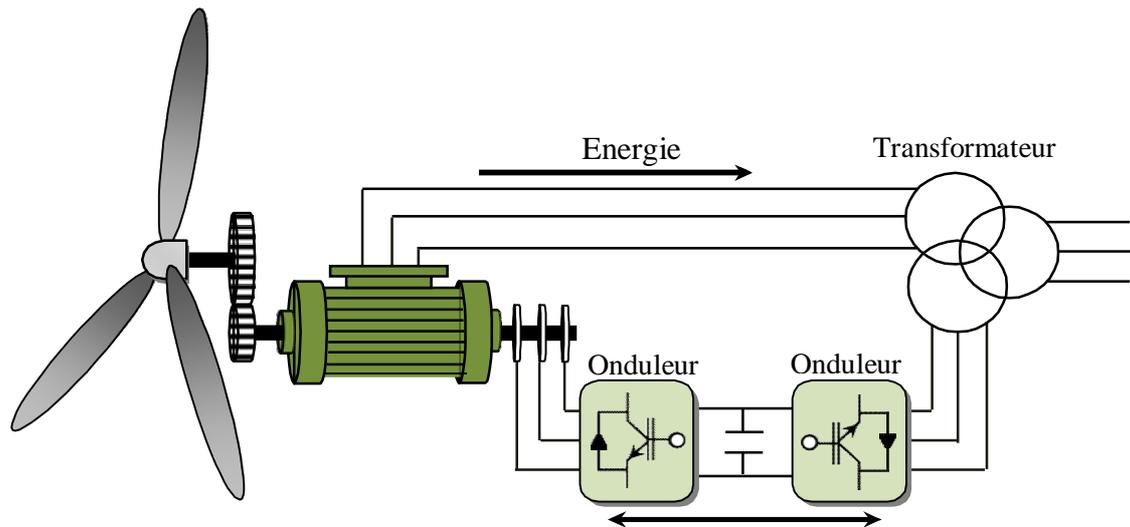


Figure III.10 : MADA à structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Type d'interrupteur	Fréquence de Commutation (kHz)	Tension max (V)	Courant max (A)	Utilisation
<b>GTO (Gate Turn-Off Thyristor)</b>	0.2 - 1	6000	4000	Très fortes puissances
<b>MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)</b>	5 -100	1000	28	Très fortes puissances
<b>BJT (Bipolar Junction Transistor)</b>	0.5 -5	1700	1000	Très fortes puissances
<b>IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor)</b>	1 - 3	6000	2000	Très fortes puissances
<b>IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)</b>	2 - 20	6000	1200	Moyennes et fortes puissances

Tableau III.2. Interrupteurs utilisés dans les convertisseurs [60].

### III.3.2. Choix de convertisseurs pour les éoliennes à base de la MADA

Les systèmes d'entraînement et de génération à base de la MADA présentés auparavant utilisent différents types de composants électroniques ayant chacun des caractéristiques bien spécifiques. Les convertisseurs à base de thyristors sont semi-commandables ce qui les rend économiques et fiables ; toutefois ils génèrent des harmoniques du courant qui peuvent nuire au filtrage, ils consomment aussi de l'énergie réactive. Les convertisseurs totalement commandables (GTO, IGCT, BJT, IGBT, MOFET) fonctionnent à haute fréquence de commutation, les harmoniques sont ainsi décalés aux ordres supérieures ce qui facilite la procédure de filtrage. Parmi les composants les plus utilisés, le transistor bipolaire à gâchette isolée (IGBT) [55], la fréquence typique de commutation de ce transistor se situe dans la gamme de 2 à 20kHz.

### III.4. Avantages et inconvénients de la MADA

Parmi les machines sollicitant un entraînement à vitesse variable, la MADA est par excellence la mieux adaptée de toutes les utilisations industrielles ; en effet cette machine présente une multitude d'avantages cités ci-dessous :

#### III.4.1. Avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, on peut citer [61], [62], [63], [55] :

- On peut ajouter des rhéostats, qui auront pour rôle de limiter le courant, le couple de démarrage sera augmenté ; par cette modification des caractéristiques du bobinage rotorique, on pourra augmenter la plage de variation de la vitesse.
- Le flux et le couple électromagnétique sont contrôlés avec précision et une grande flexibilité, par conséquent le transfert des puissances active et réactive est bien maîtrisé.
- La possibilité de fonctionner la MADA comme un filtre actif pour les harmoniques de courant grâce à la commande indirecte des puissances active et réactive par les courants rotoriques.
- Le convertisseur rotorique ne sera dimensionné qu'au tiers de la puissance nominale de la MADA, ce qui aura un impact économique très appréciable, les pertes de ce convertisseur seront minimisés, ceci va améliorer le rendement du système de conversion.
- Dans les systèmes de production d'énergie décentralisée, la MADA en fonctionnement générateur est un concurrent sérieux par rapport aux machines synchrones et

asynchrones classiques ; puisque l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse [36].

- La MADA offre la possibilité de fonctionner à couple constant, même au-delà de la vitesse nominale [55]
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances, elle est envisagée pour des puissances élevées (>1MW) où elle s'avère être une concurrente de la machine asynchrone à cage
- La MADA est une "machine généralisée", effectivement c'est une machine pouvant "assurer" tous les fonctionnements des autres machines. Par extension, cette généralisation nous permet d'envisager le pilotage de cette machine de manière plus globale en le dédiant à la gestion de l'optimisation des échanges d'énergie au sein du système auquel la MADA est intégrée
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) [55].

#### III.4.2. Inconvénients de la MADA

Malgré tous les privilèges attribués à la MADA, celle-ci présente quelques inconvénients liés essentiellement au système bagues-balais comme :

- la présence du système bagues-balais aura un impact sur le volume par rapport à une MAS à cage, pour une même puissance ;
- Dans les systèmes de production d'énergie, un surcoût est engendré par l'utilisation et la maintenance du multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais présents sur la MADA, d'autres machines telles que la machine synchrone à aimants permanents et la machine à réluctance variable n'auront pas ce problème ;
- L'utilisation de plusieurs convertisseurs, aura un impact sur le prix d'un système utilisant une MADA.

Le sujet global de notre travail de thèse étant d'étudier un système de génération d'énergie à travers une turbine éolienne couplée à une MADA utilisée en fonctionnement générateur, dans ce qui suit cette machine aura le nom de GADA (Génératrice Asynchrone à Double Alimentation).

### III.5. Modélisation de la GADA

L'étude du comportement d'un système est une tâche difficile et qui nécessite avant tout une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés, ceci pourrait se réaliser par voie de simulation. Nous devons disposer d'un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement réel de ce système.

La machine asynchrone à double alimentation correspond à une structure de principe représentée sur la Figure (III.11). Les armatures magnétiques du stator et du rotor sont cylindriques, séparées par un entrefer constant, et munies chacune d'un enroulement triphasé.

- Le stator comporte 3 enroulements dont les axes magnétiques OA, OB et OC sont décalés dans l'espace de  $120^\circ$ .
- Le rotor bobiné comporte 3 enroulements triphasés avec le même nombre de pôles que celui du stator. Les trois bobinages rotoriques ont des axes magnétiques  $O_a$ ,  $O_b$  et  $O_c$  décalés dans l'espace de  $120^\circ$ .

Avant d'aborder la commande de la Machine Asynchrone Double Alimentation, comme bien d'autres procédés, il faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise de ses constituants, à partir du traitement mathématique de ce modèle, on pourra faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ; ainsi que l'étude et l'analyse des différents régimes de fonctionnement. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental.

Une première difficulté réside dans la commande de cette machine à cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique ; la deuxième est liée à l'identification des paramètres [64].

#### III.5.1. Hypothèses simplificatrices

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de sa commande, on rappelle brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, devenues classiques, et qui sont [58] :

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température, l'effet de peau est par conséquent négligeable ;

- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante ;
- La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer, est sinusoïdale ;
- Le neutre n'étant pas connecté, il n'y'a pas de régime homopolaire ;
- La symétrie de construction est parfaite.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, les flux sont additifs, les inductances propres sont constantes et qu'il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques [58].

### III.5.2. Modèle triphasé de la MADA

#### III.5.2.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé

La machine asynchrone à double alimentation est formée d'un stator fixe et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle et sont alimentés par un système de tensions triphasées. Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine (Théorème de Ferraris). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est  $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$  où  $\omega_s$  désigne la pulsation du réseau d'alimentation statorique triphasée et  $p$  le nombre de paires de pôles. Le rotor de la machine porte, de même, un bobinage triphasé avec le même nombre de paires de pôles que celui du stator [65].

La machine asynchrone à double alimentation est représentée dans le système triphasé par la figure suivante.

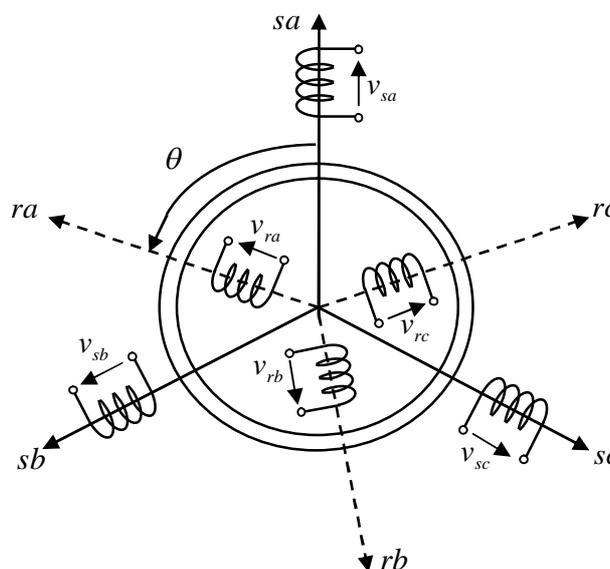


Figure III.11 : Représentation électrique des enroulements de la MADA dans le system triphasée.

### III.5.2.2. Les équations électriques

La loi de Faraday, qui exprime la tension  $v$  aux bornes d'une bobine, est donnée la relation suivante :

$$v(t) = R.i(t) + \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (\text{III.3})$$

Appliquons cette relation aux enroulements triphasés du stator et du rotor, nous trouvons :

- **Pour le stator**

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s.i_{sa} + \frac{d}{dt}\varphi_{sa} \\ v_{sb} = R_s.i_{sb} + \frac{d}{dt}\varphi_{sb} \\ v_{sc} = R_s.i_{sc} + \frac{d}{dt}\varphi_{sc} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Où

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (\text{III.5})$$

- **Pour le rotor**

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r.i_{ra} + \frac{d}{dt}\varphi_{ra} \\ v_{rb} = R_r.i_{rb} + \frac{d}{dt}\varphi_{rb} \\ v_{rc} = R_r.i_{rc} + \frac{d}{dt}\varphi_{rc} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Où

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} ; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} ; \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} ; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Et :

$$[V_s] = [v_{sa} \quad v_{sb} \quad v_{sc}]^T : \text{Vecteur des tensions instantanées des phases a,b et c statoriques.}$$

$[I_s] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T$  : Vecteur des courants instantanés des phases a,b et c statoriques.

$[\varphi_s] = [\varphi_{sa} \quad \varphi_{sb} \quad \varphi_{sc}]^T$  : Vecteur des flux instantanés des phases a,b et c statoriques.

$[V_r] = [v_{ra} \quad v_{rb} \quad v_{rc}]^T$  : Vecteur des tensions instantanées des phases a,b et c rotoriques.

$[I_r] = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T$  : Vecteur des courants instantanés des phases a,b et c rotoriques.

$[\varphi_r] = [\varphi_{ra} \quad \varphi_{rb} \quad \varphi_{rc}]^T$  : Vecteur des flux instantanés des phases a,b et c rotoriques .

$R_s$  et  $R_r$  : Résistances d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement;

### III.5.2.3. Les relations flux – courants (relations électromagnétiques)

Ces équations sont données par :

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M][I_r] \quad (\text{III.10})$$

$$[\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M][I_s] \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_{ss} & m_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & l_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & m_{ss} & l_{ss} \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_{rr} & m_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & l_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & m_{rr} & l_{rr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

$$[M] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$l_{ss}$  et  $l_{rr}$  : Inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

$m_{ss}$  et  $m_{rr}$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques, respectivement.

$m_{sr}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique.

### III.5.3. La transformation de Park

#### III.5.3.1. Définition

La transformation de Park permet de ramener les variables d'un repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère biphasé tournant (d - q). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère comme le montre la figure (III.12).

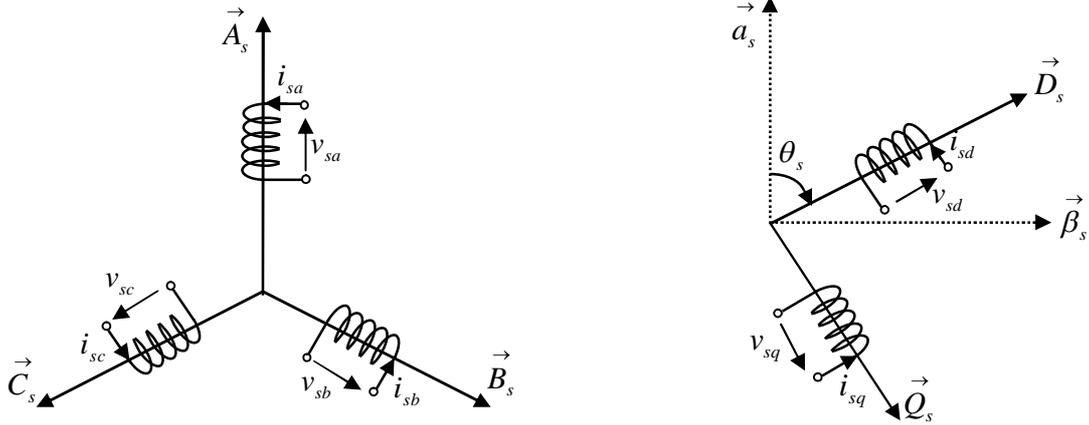


Figure III.12 : Repérage angulaire du système d'axes  $(d - q)$  associé au stator de la MADA.

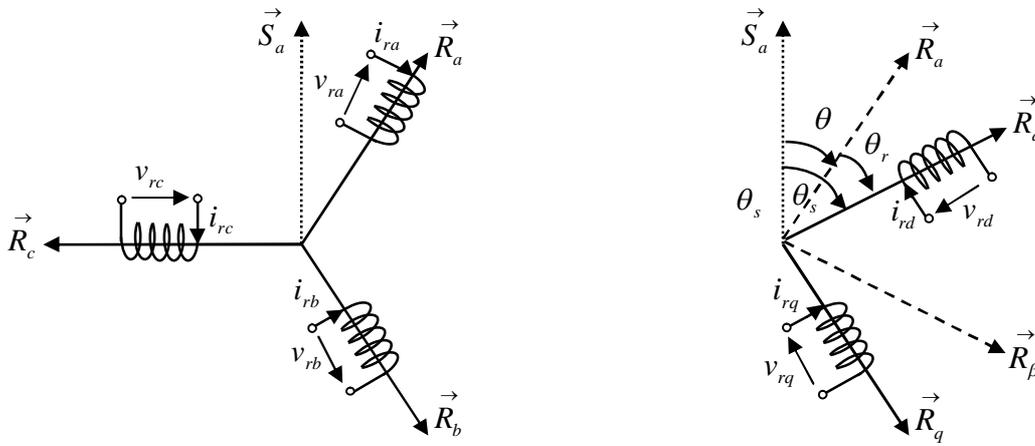


Figure III.13 : Repérage angulaire du système d'axes  $(d - q)$  associé au rotor de la MADA.

Nous remarquons sur la figure (III.13) que  $\theta_s$  et  $\theta_r$  sont liés naturellement à  $q$  par la relation rigide:

$$\theta = \theta_s - \theta_r \tag{III.14}$$

Et par suite:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \tag{III.15}$$

La transformation matricielle définissant la transformation de Park est la suivante [9] :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)][x_{abc}] \tag{III.16}$$

Avec :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{III.17}$$

Et

$$\left[ P(\theta)^{-1} \right] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

### III.5.3.2. Choix de référentiel de Park

Suivant la constitution et le principe de fonctionnement de la MADA, nous trouvons trois choix utiles pour le référentiel ( $d - q$ ):

- **Référentiel fixe au stator** (référentiel stationnaire  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$ ) : Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.
- **Référentiel fixé au rotor** (référentiel tournant  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0 = \omega = p \cdot \Omega$ ) : Ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires.
- **Référentiel fixé au champ tournant statorique** (référentiel tournant à la vitesse de pulsation statorique  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ ) : Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude et la synthèse des lois de commande. Les axes sont désigné par ( $d, q$ ).

C'est ce dernier référentiel que nous allons utiliser en vue de l'étude de la commande vectorielle à flux statorique orienté que nous présenterons au chapitre suivant. Ce choix permet de définir une pulsation de glissement  $\omega_g = \omega_s - \omega_r$ .

## III.5.4. Modèle diphasé de la MADA

### III.5.4.1. Equations électriques

La substitution des enroulements fictifs  $S_d, S_q, R_d, R_q$  aux enroulements triphasés du modèle (III.4), (III.6) permet l'écriture des équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - \omega_r \varphi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

### III.5.4.2. Relations flux - courants

Nous appliquons la transformation de Park aux relations entre flux et courants (III.10), (III.11), nous trouvons les relations électromagnétiques de la machine généralisée:

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Ou:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{sd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{rd} \\ i_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{rq} \\ i_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{rd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{sd} \\ i_{rq} = \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Avec:

$$L_s = l_{ss} - m_{ss}, L_r = l_{rr} - m_{rr}, M = \frac{3}{2} m_{sr} \quad (\text{III.22})$$

### III.5.4.3. Equation mécanique

L'équation mécanique est exprimée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f_{vis} \cdot \Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{III.23})$$

Avec :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (\text{III.24})$$

$$C_{em} = p (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{III.25})$$

### III.5.4.4. Le couple électromagnétique

A ces équations, il faut ajouter l'équation générale du couple électromagnétique qui peut être dérivée de l'expression de la co-énergie et qui s'exprime par:

$$C_{em} = [I_s]^T \left\{ \frac{d}{dt} [M] \right\} [I_r] \quad (\text{III.26})$$

Après l'application de la transformation de Park sur cette équation, nous aboutissons à l'expression:

$$C_{em} = p \cdot M (i_{rd} i_{sq} - i_{sd} i_{rq}) \quad (\text{III.27})$$

En utilisant les expressions (III.25), (III.26) et (III.27), d'autres expressions du couple électromagnétique peuvent être trouvées :

$$C_{em} = p (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{III.28})$$

Ou :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\varphi_{sq} i_{rd} - \varphi_{sd} i_{rq}) \quad (\text{III.29})$$

### III.5.4.5. Puissances statoriques

Les puissances actives et réactives échangées avec le réseau électrique dépendent aussi des variables électriques du stator et du rotor. Au stator, les puissances active et réactive sont respectivement données par [30] :

$$\overline{S}_s = V_s \overline{S}_s^* \quad (\text{III.30})$$

Alors, les expressions des puissances active et réactive statoriques, sont exprimés par :

$$\begin{cases} P_s = \text{Réel} [\overline{S}_s] \\ Q_s = \text{Im} [\overline{S}_s] \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

Après la transformation de Park, nous trouvons :

$$\begin{cases} P_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q_s = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

### III.5.5. Modèle d'état de Park de la MADA

Nous pouvons exprimer le modèle d'état de Park de la MADA sous la forme matricielle suivante [55]:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \varphi_{sd} + \omega_s \cdot \varphi_{sq} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} + v_{sd} \\ \frac{d\varphi_{sq}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \varphi_{sq} - \omega_s \cdot \varphi_{sd} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rq} + v_{sq} \\ \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \varphi_{sd} - \frac{M}{L_s} \omega \varphi_{sq} - \left( R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s \right) i_{rd} + \sigma L_r \omega_r i_{rq} + \left( v_{rd} - \frac{M}{L_s} v_{sd} \right) \\ \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \varphi_{sq} + \frac{M}{L_s} \omega \varphi_{sd} - \left( R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s \right) i_{rq} - \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \left( v_{rq} - \frac{M}{L_s} v_{sq} \right) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (C_{em} - C_r) - \frac{F}{J} \omega \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

Où :  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  est le coefficient de dispersion des flux magnétiques.

Il nous reste maintenant à décrire l'équation mécanique de la machine sous la forme :

$$C_{em} = C_r + f_v + J_g \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III.34})$$

Avec :

$C_{em}$  : le couple électromagnétique.

$C_r$  : le couple résistant.

$f_v$  : le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

$\Omega$  : la vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

$J_g$  : l'inertie des parties tournantes de la GADA.

Les équations suivantes sont équivalentes et permettent de calculer le couple électromagnétique :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{em} = \frac{pM}{L_s L_r - M} (\varphi_{rd} \varphi_{sq} - \varphi_{rq} \varphi_{sd}) \\ C_{em} = \frac{pM}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \\ C_{em} = pM (I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) \\ C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) \end{array} \right. \quad (\text{III.35})$$

Avec :  $p$  : le nombre de paires de pôles de la GADA.

### III.6. Modélisation des convertisseurs de puissance

#### III.6.1. Description des composants du système d'alimentation de la GADA

Comme le montre la figure (III.14), la partie convertisseurs de puissance reliant le rotor de la GADA avec le réseau est principalement constituée par :

- ❖ Le convertisseur côté rotor qui permet de contrôler les puissances active et réactive échangées entre le stator de la GADA et le réseau.
- ❖ Un bus continu.
- ❖ Le convertisseur côté réseau qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive échangée entre le rotor et le réseau.

Les convertisseurs sont bien évidemment commandés en MLI (PWM).

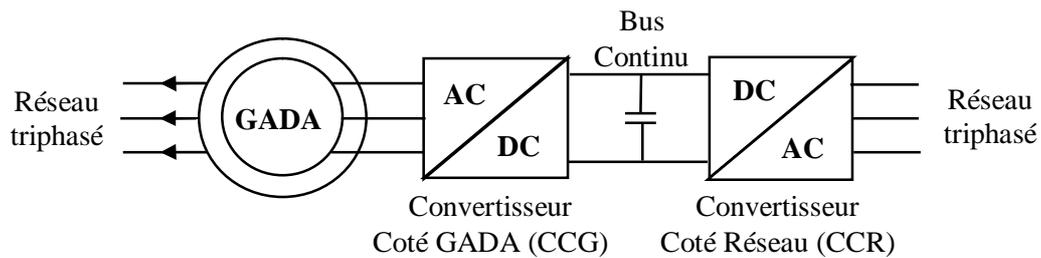


Figure III.14 : Composants du système d'alimentation de la GADA.

### III.6.2. Convertisseur côté réseau (CCR)

L'onduleur de tension représente aujourd'hui un composant essentiel dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Son utilisation vient du fait qu'il permet entre autre de contrôler les puissances actives et réactive échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR avec le réseau électrique via le filtre RL. La figure (III.15) illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique constituée du bus continu du CCR et du filtre d'entrée.

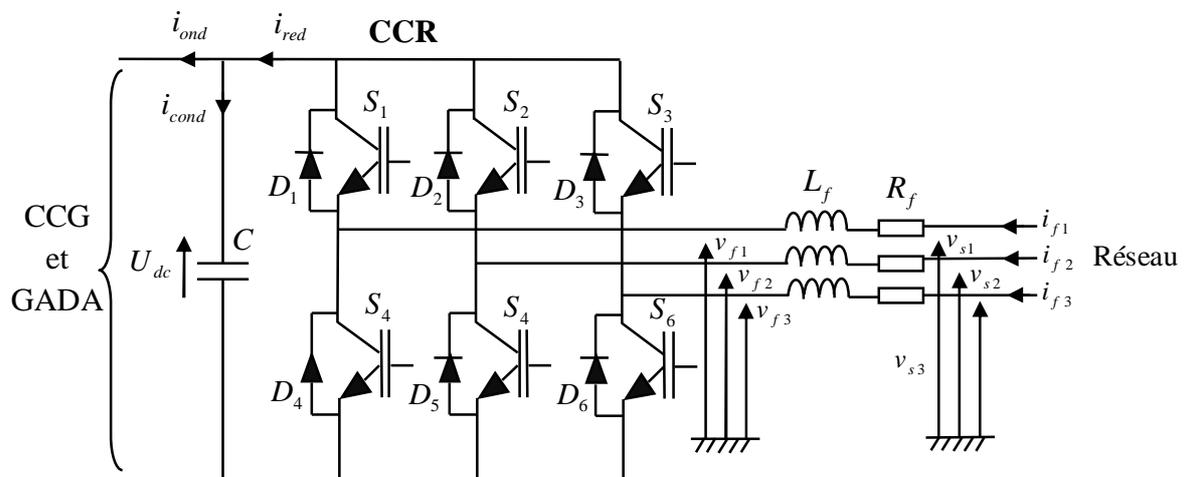


Figure III.15 : Connexion du CCR au réseau électrique.

Avec :

$i_{ond}, i_{red}$  : Respectivement les courants modulés par le CCG et le CCR.

$i_{cond}$  : Le courant traversant le condensateur.

$U_{dc}$  : La tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur).

$S_i, D_i$  : Respectivement les transistors IGBT et les diodes connectées en antiparallèle ( $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ).

$R_f$  et  $L_f$  : respectivement la résistance et l'inductance du filtre RL.

$v_{fk}'$  : Les tensions simples modulées par le CCR ( $k \in \{1, 2, 3\}$ ).

$v_{sk}$  : Les tensions simples du réseau électrique.

$i_{f1}', i_{f2}'$  : Les courants circulant à travers le filtre RL.

### III.6.2.1. Modèle du bus continu

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{cond} \quad (III.36)$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un noeud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR (figure (III.15)) :

$$i_{cond} = i_{red} - i_{ond} \quad (III.37)$$

### III.6.2.2. Modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park

D'après la figure (III.15), nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les expressions suivantes :

$$\begin{cases} v_{f1}' = -R_f \cdot i_{f1}' - L_f \frac{di_{f1}'}{dt} + v_{s1} \\ v_{f2}' = -R_f \cdot i_{f2}' - L_f \frac{di_{f2}'}{dt} + v_{s2} \\ v_{f3}' = -R_f \cdot i_{f3}' - L_f \frac{di_{f3}'}{dt} + v_{s3} \end{cases} \quad (III.38)$$

En appliquant la transformation de Park au système d'équations précédent, nous obtenons :

$$\begin{cases} v_{fd} = -R_f \cdot i_{fd} + \dot{\theta}_s \cdot L_f \cdot i_{fq} + v_{sd} - L_f \frac{di_{fd}}{dt} \\ v_{fq} = -R_f \cdot i_{fq} + \dot{\theta}_s \cdot L_f \cdot i_{fd} + v_{sq} - L_f \frac{di_{fq}}{dt} \end{cases} \quad (III.39)$$

### III.6.3. Convertisseur côté génératrice (CCG)

En suivant la même démarche que précédemment, le modèle en triphasé de la liaison du CCG avec la génératrice s'écrit (voir figure (III.16)) :

$$\begin{cases} v_{r1} = -R_r \cdot i_{ond1} - L_r \frac{di_{ond1}}{dt} + v_{ond1} \\ v_{r2} = -R_r \cdot i_{ond2} - L_r \frac{di_{ond2}}{dt} + v_{ond2} \\ v_{r3} = -R_r \cdot i_{ond3} - L_r \frac{di_{ond3}}{dt} + v_{ond3} \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

En appliquant la transformation de Park au système d'équations précédent, nous obtenons :

$$\begin{cases} v_{rd} = -R_r \cdot I_{rd} - L_r \frac{di_{ondd}}{dt} + v_{ondd} \\ v_{rq} = -R_r \cdot I_{rq} - L_r \frac{di_{ondq}}{dt} + v_{ondq} \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

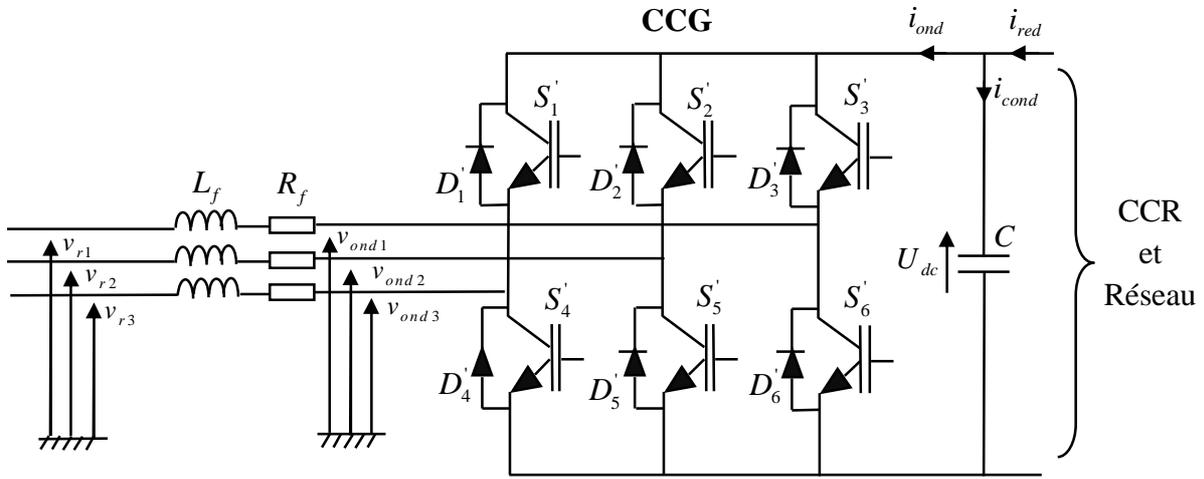


Figure III.16 : Connexion du CCG au rotor de la GADA.

Avec :

$S'_i, D'_i$  : respectivement les transistors IGBT et les diodes connectées en antiparallèle ( $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ).

$R_r$  et  $L_r$  : respectivement la résistance et l'inductance d'enroulement du rotor de la GADA.

$v_{ondk}$  : les tensions simples modulées par le CCG ( $k \in \{1, 2, 3\}$ ).

$v_{rk}$  : les tensions simples du rotor de la GADA.

$i_{ondk}$  : les courants circulant à travers les enroulements du rotor de la GADA.

### III.7. Stratégie de commande de la GADA

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactive statoriques [66].

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère  $(d, q)$  afin que l'axe  $d$  soit aligné sur le flux statorique  $\varphi_s$

Ainsi :

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{sq} = 0 \quad (\text{III.42})$$

Le couple électromagnétique de l'équation (III.35) s'écrit alors :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} I_{rq} \varphi_{sd} \quad (\text{III.43})$$

Et de l'équation (III.20), on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ 0 = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

Si l'on suppose que le réseau électrique est stable, ayant pour tension simple  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique  $\varphi_s$  constant. Cette considération associée à l'équation (III.43), montre que le couple électromagnétique  $C_{em}$  est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature  $I_{rq}$ .

Souvent dans le cas d'une MADA de moyenne et de grande puissance, la résistance statorique  $R_s$  est négligée lors de la synthèse de son modèle sous l'hypothèse d'orientation du flux statorique [67].

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.45})$$

A l'aide de l'équation (III.44), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = -\frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.46})$$

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.48})$$

Ou bien encore, d'après remplacer les équations (III.46) dans (III.48), par :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.49})$$

De l'expression (III.45) nous pouvons écrire :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.50})$$

L'expression des puissances (III.49) peut donc se simplifier de la manière suivante:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.51})$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante  $M$  constante, on remarque que l'équation (III.51) fait apparaître que la puissance active  $P_s$  statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature  $I_{rq}$ , la puissance réactive  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $I_{rd}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ .

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux (III.20), les courants statoriques par l'expression (III.46), on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.52})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.53})$$

Où  $g$  correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

En examinant les équations (III.51) et (III.53), on peut établir le schéma bloc de la figure (III.17) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement  $g$ , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes  $d$  et  $q$  pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

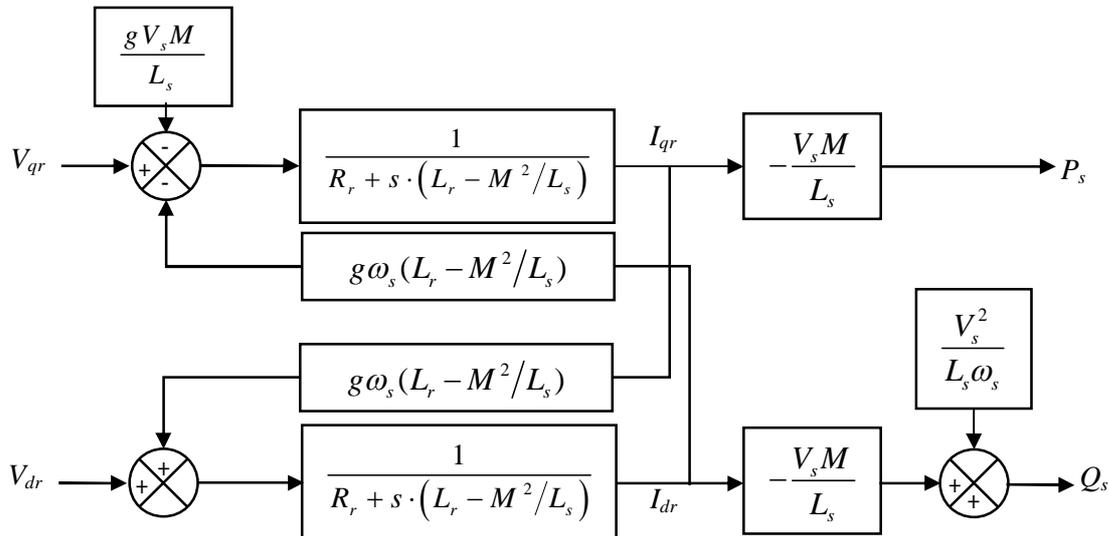


Figure III.17 : Schéma bloc de la GADA.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [66] :

- ❖ La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode est appelée méthode directe car les régulateurs de puissances contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- ❖ La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte découle directement des équations (III.51) et (III.53).

### III.7.1. Méthode directe

Pour réguler la machine par cette méthode, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (III.17).

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes du contrôle du fait de la faible valeur de glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure (III.18).

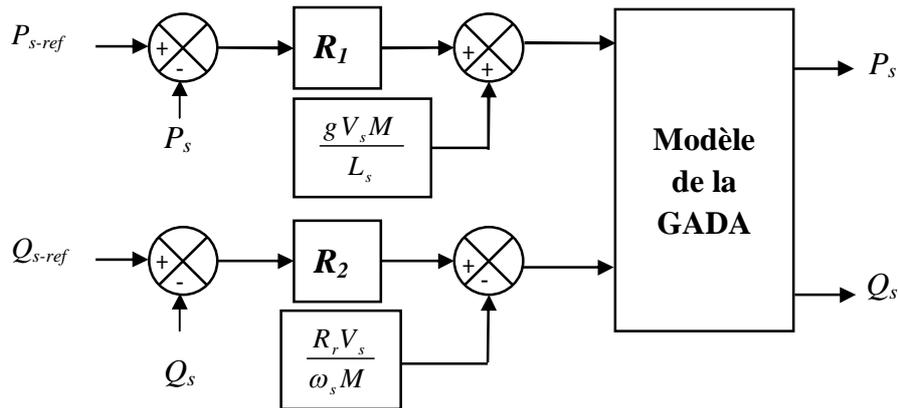


Figure III.18 : Schéma bloc de la commande directe de la GADA.

Avec  $R_1$  et  $R_2$  sont les régulateurs de puissances, ils ont été choisis de type PI classique.

### III.7.2. Méthode indirecte

Le schéma bloc du contrôle indirect de la GADA sans boucle de puissance est représenté sur la figure (III.19). Il consiste à contrôler ces puissances indirectement par le réglage des deux composantes directe et en quadrature du courant rotorique par des correcteurs PI dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances.

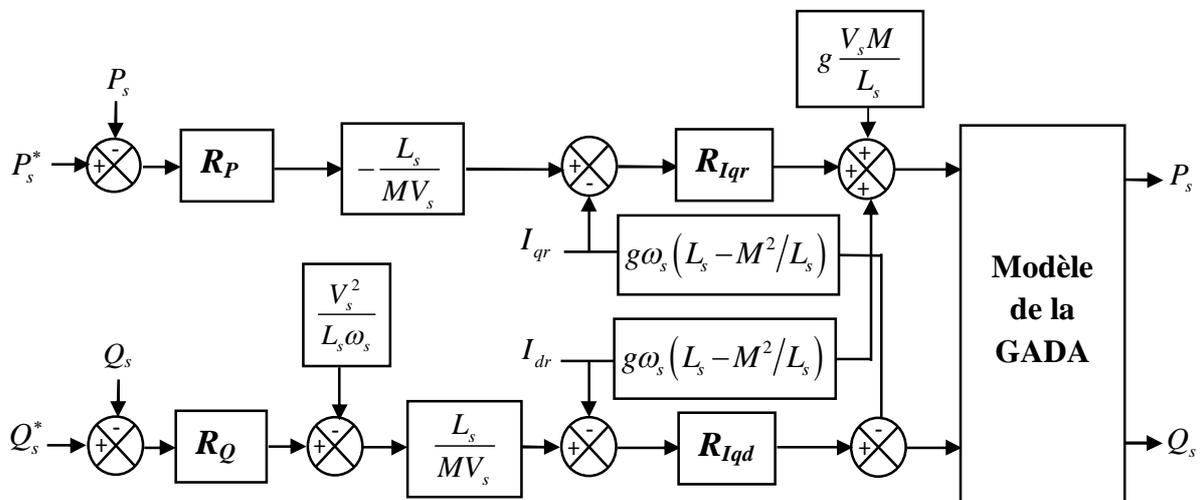


Figure III.19 : Schéma bloc de la commande indirecte de la GADA.

### III.8. Synthèse des régulateurs PI

Les régulateurs PI utilisés pour le réglage des puissances active et réactive et des courants  $I_{rd}$   $I_{rq}$ . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe (C) dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

### III.9. Résultats de simulation d'un régulateur PI

Les lois de commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs. Elles devront également opérer un bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système étant donné la complexité et le nombre important de capteurs mis en jeu. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température et de saturation. La consigne de puissance active permettra à la machine de fonctionner à la puissance maximale conférant le meilleur rendement possible au système éolien. Les paramètres de la génératrice utilisée pour la simulation sont données dans l'annexe C.

#### III.9.1. Test de suivi de consigne

Ce premier essai consiste à imposer des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée à sa vitesse nominale. La figure (III.20) représente respectivement les profils des puissances statoriques de référence. Nous avons ici des dynamiques appropriées pour les références des puissances afin de tester leur découplage.

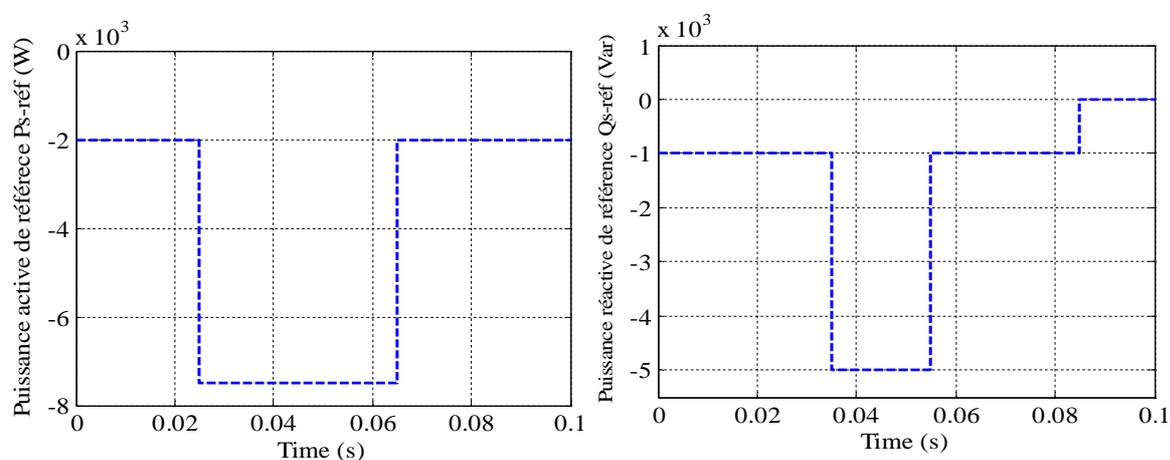


Figure III.20 : Profils de références des puissances active et réactive imposées dans les simulations.

Les figures (III.21) et (III.22) représentent successivement, les résultats obtenus de la simulation des deux méthodes directe et indirecte de commande en puissances de la GADA, relatif à ce premier test.

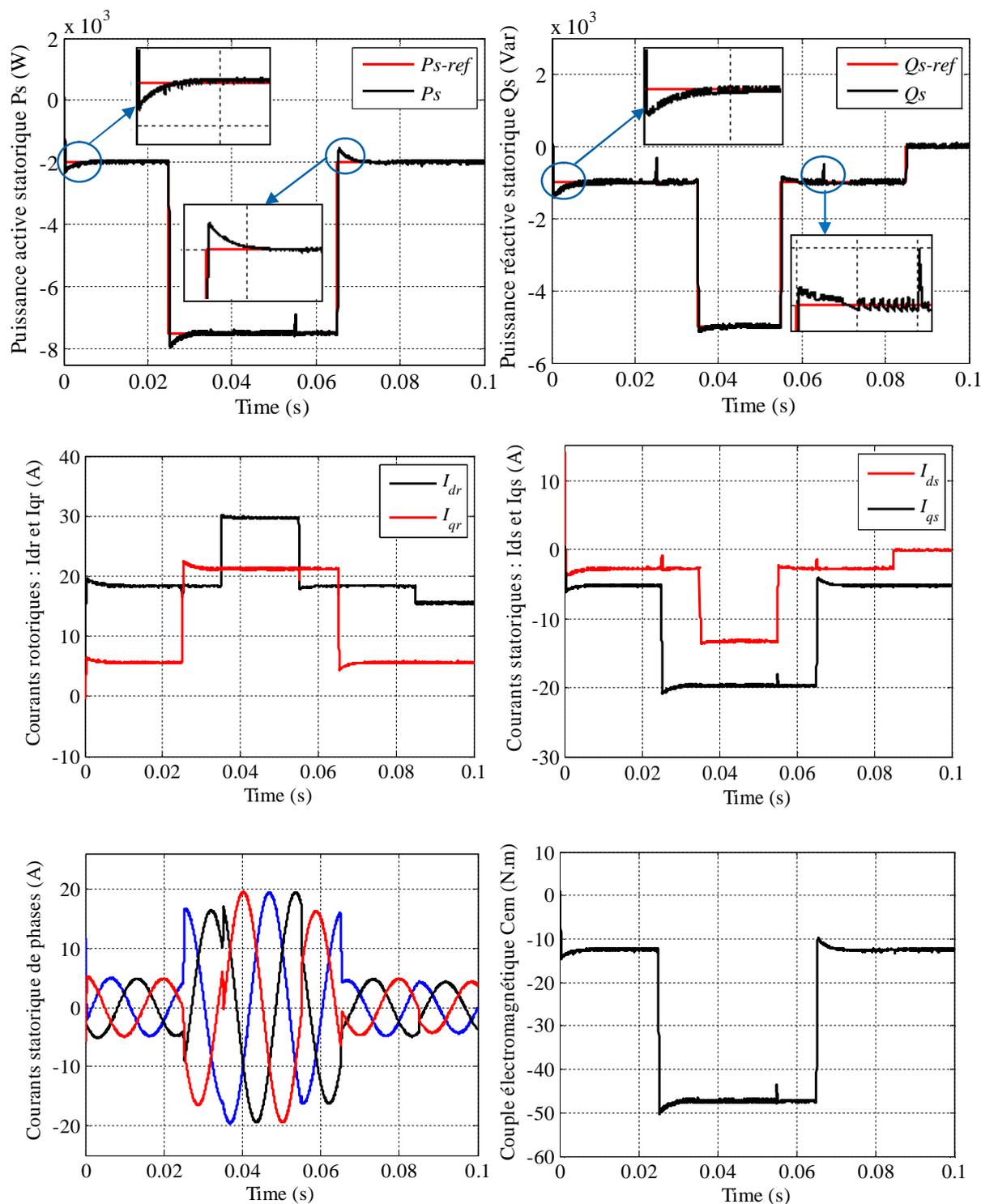


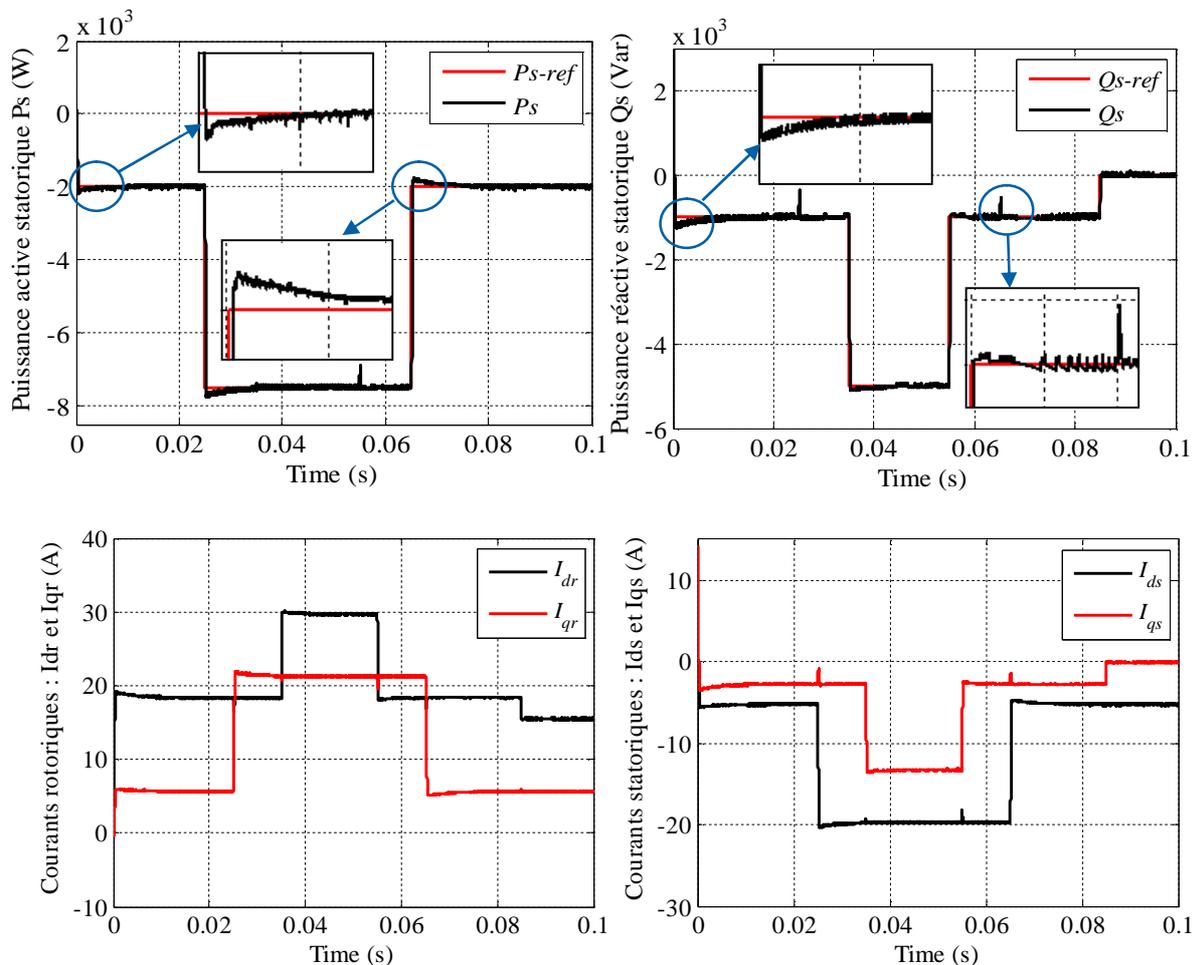
Figure III.21 : Commande en puissances de la GADA par la méthode directe (test de suivi de consigne).

D'après ces résultats, on peut remarquer pour les deux méthodes de commande que les consignes de puissance sont bien suivies par la génératrice aussi bien pour la puissance active

que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande ( $d$  et  $q$ ) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur la seconde.

Nous pouvons également remarquer que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active. Ceci est traduit par sa forme identique à celle de la puissance active. Dans ce cas, nous pouvons conclure que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique ; alors que la puissance réactive est une conséquence de l'excitation du circuit rotorique. Nous constatons aussi que les composantes directes du courant statorique et du courant rotorique ainsi que les composantes en quadratiques de ces courants présentent les mêmes allures, ce qui reflète l'équation (III.26).

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que les courants statoriques de phases ont des formes presque sinusoïdales, ce qui signifie une bonne qualité d'énergie fournie au récepteur.



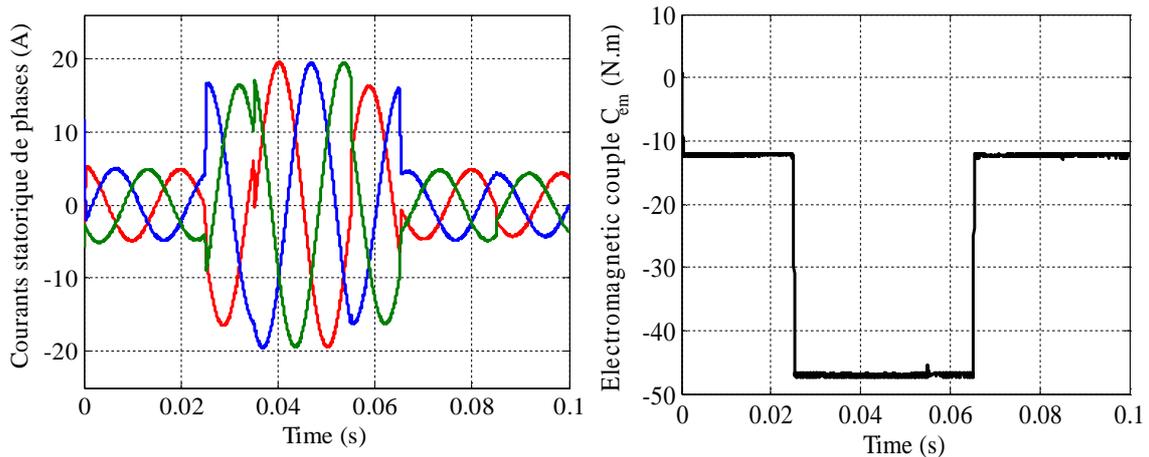


Figure III.22 : Commande en puissances de la GADA par la méthode indirecte (test de suivi de consigne).

### III.9.2. Sensibilité aux perturbations

Cet essai nous permet de vérifier le comportement de la commande en puissances de la GADA par les deux méthodes étudiées, lorsque la vitesse de rotation de la machine varie graduellement de sa valeur nominale à une valeur supérieure à la vitesse de synchronisme. Le profil de la vitesse mécanique imposée de la GADA est illustré par la figure (III.23). Les résultats de simulation obtenus sont exposés dans la figure (III.24).

Cette figure montre que la variation de vitesse de rotation a induit une légère augmentation du temps de réponse des courbes de puissances de la méthode indirecte, car cette dernière tien en compte les termes de couplage qui sont fonction de la vitesse de rotation de la GADA. Ces termes ont été négligés dans la méthode directe c'est pour cela, l'effet de la variation de la vitesse est presque négligeable par rapport à la méthode indirecte.

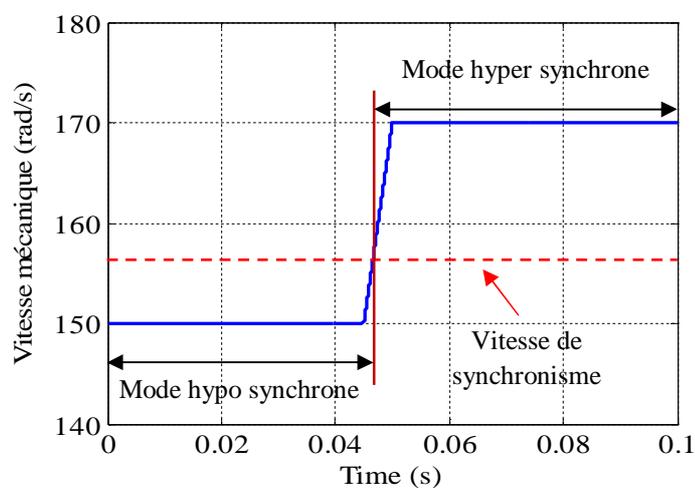


Figure III.23 : Profil de la vitesse de rotation imposée de la GADA (en bleu).

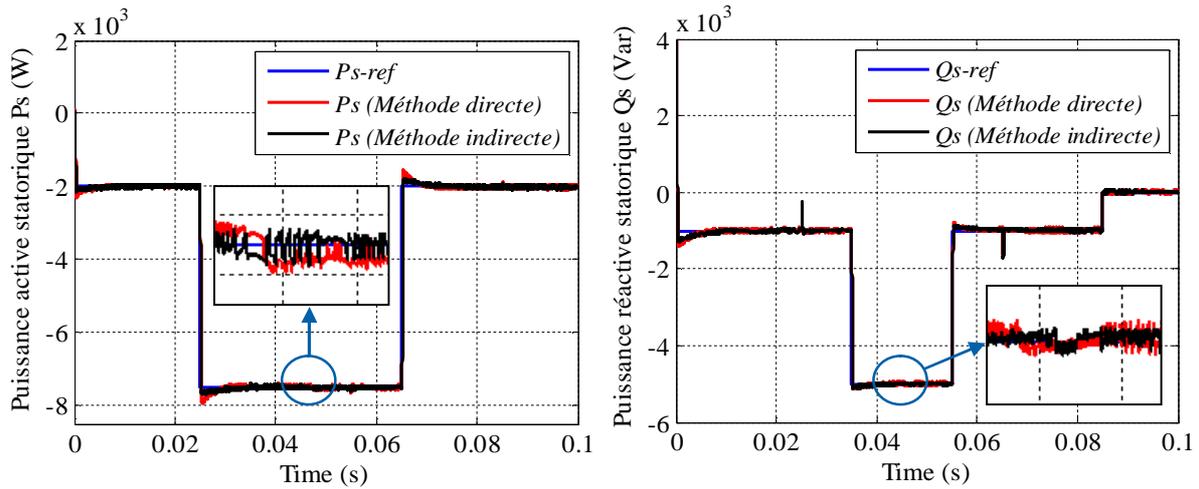


Figure III.24 : Effet de variation de la vitesse de rotation sur la commande en puissances de la GADA.

### III.9.3. Test de robustesse

L'identification paramétrique de la machine ne donne pas lieu à des valeurs exactes et définitives. En plus, ces valeurs (paramètres de la machine) sont souvent liées à l'état d'exploitation de la machine (échauffement, variation de la charge, saturation de circuits magnétiques, forme de l'entrefer, effet pelliculaire, régime défluxé, ... etc.). Pour cela, nous avons pensé qu'il est plus judicieux de tester l'influence d'une éventuelle erreur des paramètres sur les performances de la commande indirecte.

L'essai de robustesse consiste à faire varier les paramètres du modèle de la GADA utilisée. En effet les calculs de correcteurs basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés fixes. L'identification de ces paramètres est soumise à des imprécisions dues à la méthode employée et aux appareils de mesure.

La robustesse des deux méthodes de commande suite au changement des paramètres de la GADA est testée par les conditions suivantes :

La robustesse des deux méthodes de commande suite au changement des paramètres de la GADA est testée par les conditions suivantes :

- ❖ Résistances  $R_s$  et  $R_r$  multipliées par 2.
- ❖ Inductances  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M$ , divisées par 2.
- ❖ La vitesse mécanique est supposée fixe et égale à sa valeur nominale.

Les figures (III.25)-(III.26), représentent les résultats obtenus de la simulation des deux méthodes directe et indirecte de commande de la GADA, relatif à ce test.

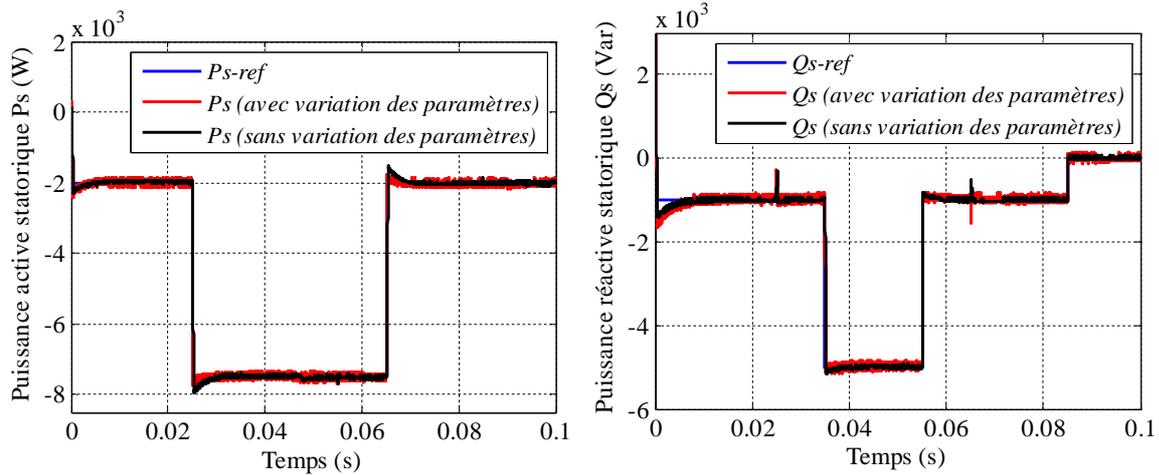


Figure III.25 : Commande en puissances de la GADA par la méthode directe (test de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques).

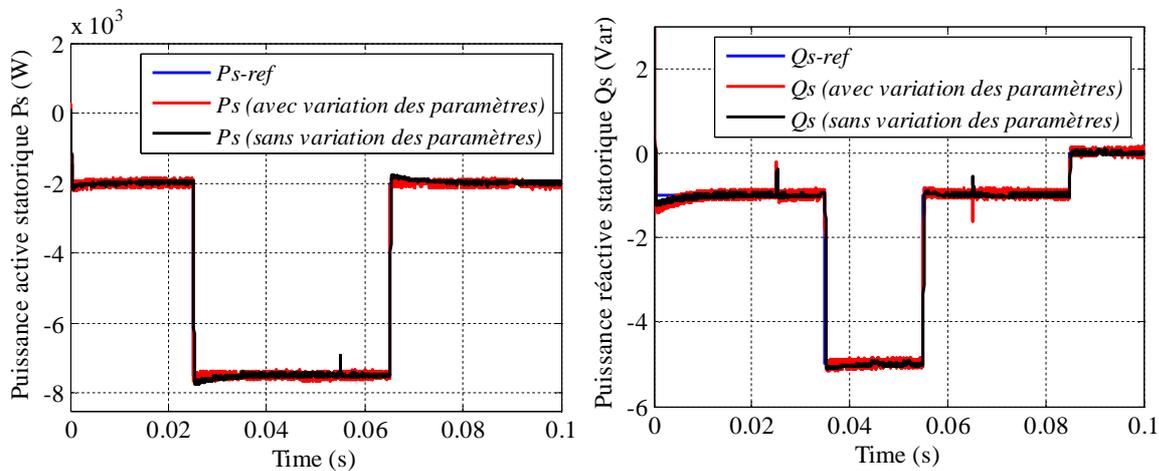


Figure III.26 : Commande en puissances de la GADA par la méthode indirecte (test de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques).

D'après ces résultats, on peut remarquer que la variation paramétrique excessive effectuée sur le modèle de la GADA a engendré des effets clairs sur les courbes de puissances actives et réactives des deux méthodes utilisées. Ces effets sont apparus sur les deux régimes de fonctionnement de la GADA : transitoires et permanents. Dans les régimes transitoires, on peut remarquer une augmentation légère des temps de réponses des courbes de puissances pour les deux méthodes, tandis que dans les régimes permanents, des perturbations ont été générés sur les résultats obtenus, tel que ces effets sont apparues plus importants sur les réponses de la méthode directe par rapport à celles indirecte (voir surtout les courbes des écarts présentés sur la figure (III.27)). Cette différence est due à l'avantage de présence des boucles supplémentaires de régulation des courants rotoriques existantes dans la méthode indirecte, ce qui a contribué à l'augmentation de la robustesse de cette méthode.

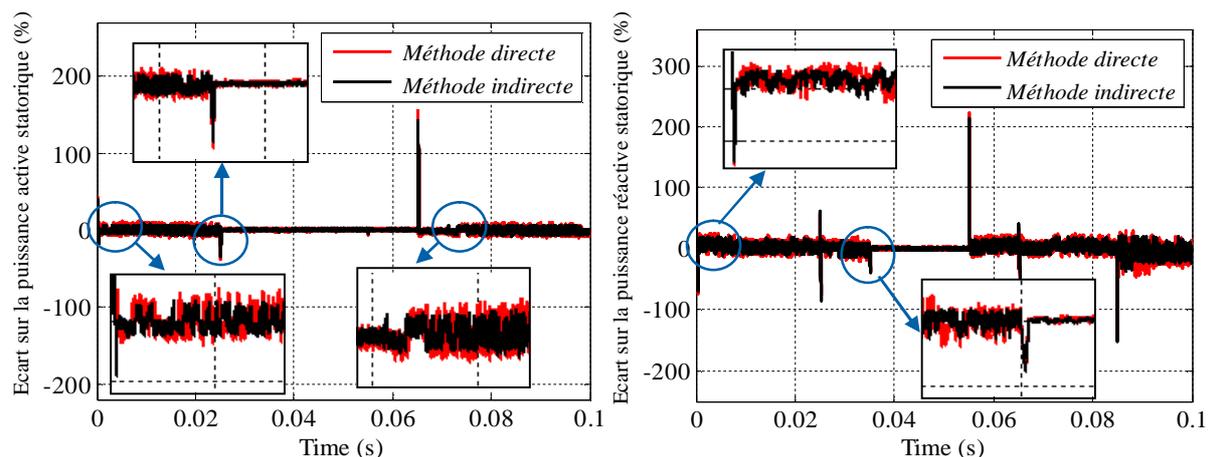


Figure III.27 : Comparaison des écarts sur les puissances active et réactive des deux méthodes de commande de la GADA (test de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques).

### III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation et la commande vectorielle de la GADA a été exposée. La méthode du flux orienté appliquée depuis quelques années à la machine asynchrone à double alimentation reste la méthode la plus répondue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux.

La commande vectorielle de la GADA que nous avons développé présente une poursuite satisfaisante de la référence. Il faut signaler que le régulateur PI ne permet pas dans tous les cas de maîtriser les régimes transitoires, et en général, les variations paramétriques de la machine.

Cependant, il existe des commandes modernes qui s'adaptent mieux avec ces exigences et qui sont moins sensibles et robustes.

Notre prochain chapitre est consacré à l'une de ces commandes qui occupe une large place dans la littérature de la commande des systèmes non linéaire : c'est la commande par modes glissants.

---

---

# **Chapitre IV**

**Commande par mode glissant flou  
adaptatif d GADA**

---

---

## IV.1. Introduction

Dans la formulation de n'importe quel problème de commande, il y a typiquement des anomalies entre le système réel et le modèle mathématique développé pour la conception de contrôle. Cette distinction peut être due à la variation des paramètres de la dynamique du système ou à l'approximation du comportement complexe de système par un modèle. Ceci a mené à un intérêt intense pour l'élaboration des méthodes de contrôle robustes qui cherchent à résoudre ce problème.

Un type de lois de commande robuste, simple à calculer et à mettre en oeuvre, même pour des systèmes non linéaires, est la commande par mode glissant. Elle est apparue en Union soviétique pendant les années 60 à partir des travaux sur les commandes à structure variable, c.à.d. des commandes commutant entre plusieurs lois de commande différentes (en général linéaires) en fonction de certains critères [68]. De ce point de vue, une commande par mode glissant se distingue par sa simplicité : le critère de commutation est une surface de glissement divisant l'espace d'état en deux, et les lois de commande dans chaque demi-espace sont des constantes. Cette loi de commande est définie de manière à forcer le système à atteindre un voisinage de la surface de glissement et à y rester, pour tous les modèles de la classe d'incertitudes considérée. Cette commande a 2 principaux avantages. Premièrement, le comportement dynamique du système une fois atteint le voisinage de la surface de glissement est essentiellement conditionné par cette dernière. On dit que le système est en régime glissant. Deuxièmement, ce comportement est non seulement robuste, mais même insensible à la classe d'incertitudes pour laquelle la commande a été réglée.

Cependant, la discontinuité de la commande engendre des oscillations de fréquence élevée une fois atteint le régime glissant, phénomène connu sous le nom de *chattering*. Ce phénomène est le plus grand défaut des commandes par mode glissant, car il peut causer une perte de précision, et surtout une usure prématurée des actionneurs ou du système, en plus de générer un bruit sur des systèmes mécaniques.

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été développées par les chercheurs afin de réduire ce phénomène [68]. Deux nouvelles méthodes appliquées à la commande en puissances de la GADA intégrée dans un système éolien ont été utilisées dans ce chapitre à pour but d'augmenter les performances de la commande par mode glissant, à savoir ; la minimisation de l'effet du phénomène de *chattering* et l'amélioration de la robustesse du système. La première méthode consiste à utiliser la commande par mode glissant adaptatif

connue par ces avantages par rapport à celle classique d'ordre 1, tandis que dans la deuxième, nous nous sommes intéressés à la combinaison entre les commandes par logique floue et mode glissant adaptatif, la commande ainsi élaborée porte le nom « commande par mode glissant flou adaptatif ».

Des simulations sont réalisées à la fin du chapitre pour comparer ces méthodes en termes de poursuite de trajectoire, sensibilité aux perturbations et robustesse vis à vis les variations paramétriques.

## **IV.2. Model de l'onduleur de tension un onduleur multiniveau**

En électronique de puissance moderne, l'étude des onduleurs multiniveaux représente un domaine de recherche important, recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Si depuis plus d'une décennie les onduleurs appelés «à trois niveaux» sont devenus des produits presque classiques, d'autres topologies sont apparues au cours des dernières années, aussi bien au niveau académique qu'au niveau industriel. Parmi ces topologies on compte principalement la technique des onduleurs NPC (Neutral Point Clamped) à potentiels distribués, la technique dite des cellules imbriquées et superposées, ainsi que la technique des convertisseurs à cellules en série [69-71]. Mon travail de recherche porte sur l'étude des convertisseurs multiniveaux triphasés dont la topologie est basée sur la mise en série de plusieurs onduleurs monophasés (cellules partielles) sur la même phase. La figure 1 montre un convertisseur avec  $k$  onduleurs partiels en série. Chaque cellule partielle de rang  $j$ , ( $j = 1..k$ ) est alimentée par une tension continue  $U_{dj}$ . Elle montre qu'en alimentant les cellules partielles par des tensions continues de valeurs différentes (alimentation asymétrique), il est possible d'augmenter le nombre de niveaux à la sortie du convertisseur, sans complexité supplémentaire de sa structure [70, 72]. Ces onduleurs sont connus sous le nom d'onduleurs multiniveaux asymétriques.

### **IV.2.1. Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux**

Certaines applications nécessitent des performances de hauts niveaux mais la présence des harmoniques d'ordre peu élevé dans le signal de tension peut dégrader ces performances. Afin d'améliorer la qualité du signal de sortie de l'onduleur multiniveau asymétrique, différentes stratégies de modulation de largeurs d'impulsions ont été proposées par différents auteurs [71-75]. La plus connue est la stratégie triangulo-sinusoïdale [71-73]. Elle pousse les harmoniques vers les fréquences élevées, en ayant recours à des porteuses de hautes fréquences.

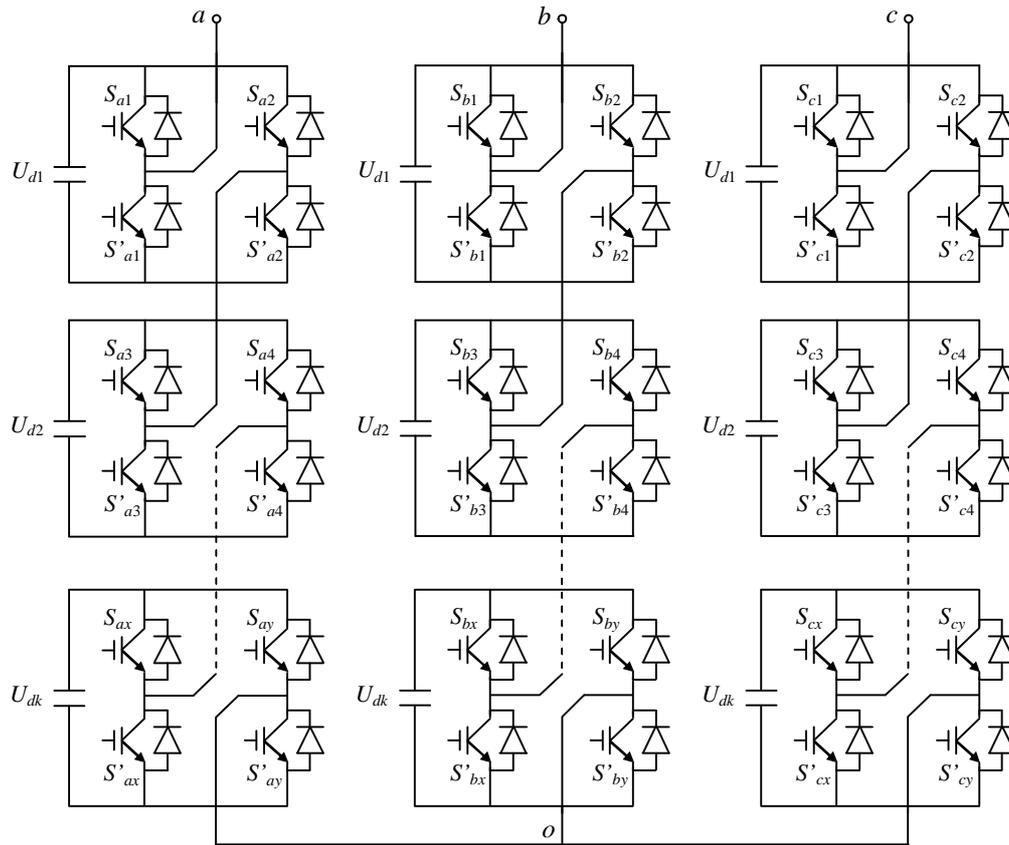


Figure IV.1: Mise en série de  $k$  onduleurs monophasés par phase.

### IV.2.2. Onduleur multiniveau asymétrique à pas uniforme

La figure 2, montre la forme de la tension généralement obtenue à la sortie d'un convertisseur multiniveau. Les valeurs  $U_{s1}, U_{s2}, \dots, U_{sN}$  correspondent aux niveaux  $N$  possibles de  $U_s$ . Le convertisseur est dit à pas uniforme ou régulier si la différence entre deux niveaux consécutifs est constante [76]. Autrement dit :

$$U_{s2} - U_{s1} = U_{s3} - U_{s2} = \dots = U_{sN} - U_{s(N-1)} = \Delta U \tag{IV.1}$$

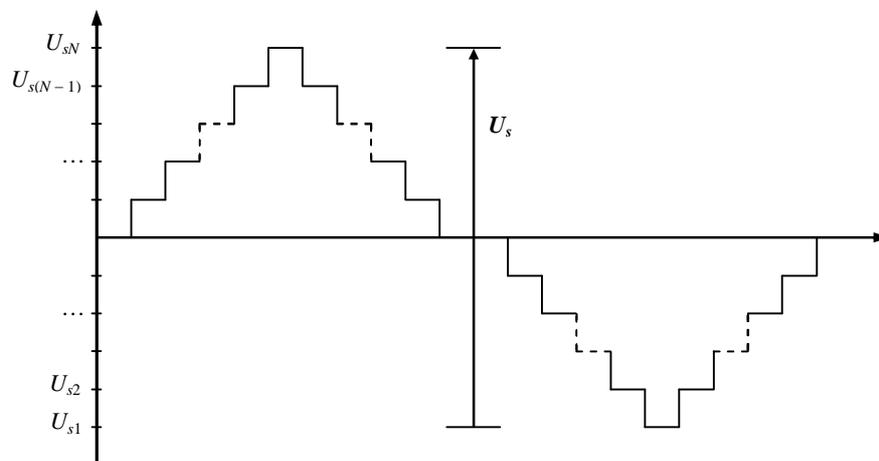


Figure IV 2: Exemple de forme d'onde d'un onduleur multiniveau

Dans le cas contraire, le convertisseur est dit à pas non uniforme ou irrégulier.

En adoptant une notation par unité (p.u.), avec  $U_{dl}$  comme tension de base, toutes les tensions intermédiaires sont des entiers naturels. Les symboles en minuscules ont été adoptés pour les grandeurs p.u :

$$u_s = \frac{U_s}{U_{dl}} \quad (IV.2)$$

$$u_{dj} = \frac{U_{dj}}{U_{dl}} \in N^*, \quad \forall j = 1..k \quad (IV.3)$$

La tension par phase à la sortie du convertisseur peut se mettre sous la forme explicitée par l'équation (4) :

$$u_s = \sum_{j=1}^k (s_j * u_{dj}) \quad (IV.4)$$

Dans cette équation,  $s_j$  représente la fonction de commande des interrupteurs de puissance. elle est issue du modulateur et ne peut prendre que trois valeurs :

$$s_j \in \{-1, 0, 1\} \quad (IV.5)$$

Pour obtenir un convertisseur à pas uniforme, les tensions  $u_{dj}$  doivent être disposées comme le montre la relation (6). Elles doivent en plus respecter la condition (7) [76].

$$u_{d1} \leq u_{d2} \leq \dots \leq u_{dk} \quad (IV.6)$$

$$u_{dj} \leq 1 + 2 \sum_{l=1}^{j-1} u_{dl} \quad (IV.7)$$

Le nombre de niveaux pour un groupe de tensions donné, s'obtient à partir de la relation suivante :

$$N = 1 + 2 \sum_{j=1}^k u_{dj} \quad (IV.8)$$

La relation (8) modifie fondamentalement le nombre de niveaux que peut générer la topologie multiniveau étudiée. Le nombre  $N$  dépend non seulement du nombre d'onduleurs partiels en série par phase, mais aussi de la tension continue qui alimente chacun d'eux.

A partir de la relation (7), on peut déduire que les valeurs maximales que peuvent prendre les grandeurs  $u_{dj}$  ( $j = 1..k$ ) sont telles que :

$$(U_{d1})_{\max} = 1, (U_{d2})_{\max}, \dots, (U_{dk})_{\max} = 3^{(k-1)} \quad (\text{IV.9})$$

Et à partir de la relation (6), on peut déduire que :

$$(U_{d1})_{\min} = 1 \quad (\text{IV.10})$$

Le tableau IV.1 donne quelques possibilités de solutions redondantes vérifiant l'équation (8). Avec  $k = 3$ , il existe 2 possibilités d'alimentation des onduleurs partiels pour obtenir une tension de 13 niveaux à la sortie du convertisseur, et 3 possibilités pour obtenir 19 niveaux [77].

$U_{d1}$ (p.u)	$U_{d2}$ (p.u)	$U_{d3}$ (p.u)	$N$
1	1	2	9
1	1	3	11
1	2	2	
1	1	4	13
1	2	3	
1	1	7	19
1	2	6	
1	3	5	

Tableau IV.1: Exemples de possibilités de solutions redondantes

La possibilité de choisir des tensions intermédiaires différentes les unes des autres, et la possibilité de redondance dans ces choix, sont autant de degrés de liberté qu'offrent les convertisseurs multiniveaux asymétriques à l'utilisateur.

### IV.2.3. Stratégies de commande

La génération d'un phaseur spatial à très haute résolution de la tension à la sortie du convertisseur est possible, si aux tensions d'alimentation des onduleurs partiels choisies, on y associe un organe de commande adéquat. Pour des convertisseurs multiniveaux symétriques, plusieurs investigations sur les stratégies de commande ont été publiées. On y retrouve principalement la modulation par gradins [72], et la modulation par largeur d'impulsions (MLI) ou « *Pulse width modulation* » (PWM) [71, 73, 78].

Dans le cas des convertisseurs multiniveaux asymétriques, les différentes stratégies de modulations existantes peuvent également être utilisées. Les modulations vectorielles peuvent exiger un temps de calcul relativement long, compte tenu de la haute résolution du phaseur spatial de la tension à la sortie du convertisseur [74, 78]. Dans cette section, nous présentons la stratégie triangulo-sinusoidale.

Pour commander un convertisseur à  $N$  niveaux de tension,  $(N-1)$  porteuses triangulaires unipolaires sont générées. Les signaux triangulaires ont la même fréquence  $f_p$  et la même amplitude  $A_p = 2/(N-1)$ . En plus, ils sont en phase et occupent une bande continue, avec un décalage vertical  $\Delta_p = 2/(N-1)$ . Celles-ci sont ensuite comparées à un système triphasé de référence d'amplitude  $A_r$  et de fréquence  $f_r$ . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à une référence, et 0 dans le cas contraire. A la sortie du modulateur la somme des résultats issus des comparaisons donne la valeur de la tension de phase correspondant à chaque niveau. Deux paramètres caractérisent cette stratégie [73, 75]:

- Indice de modulation  $m = f_p / f_r$  ;
- Taux de modulation  $r = A_r / (N-1)A_p$ .

Les tensions individuelles à la sortie de chaque onduleur monophasé ( $u_{p1}$ ,  $u_{p2}$  et  $u_{p3}$ ) et la tension simple de la phase  $a$  sont donnés par la figure 3.

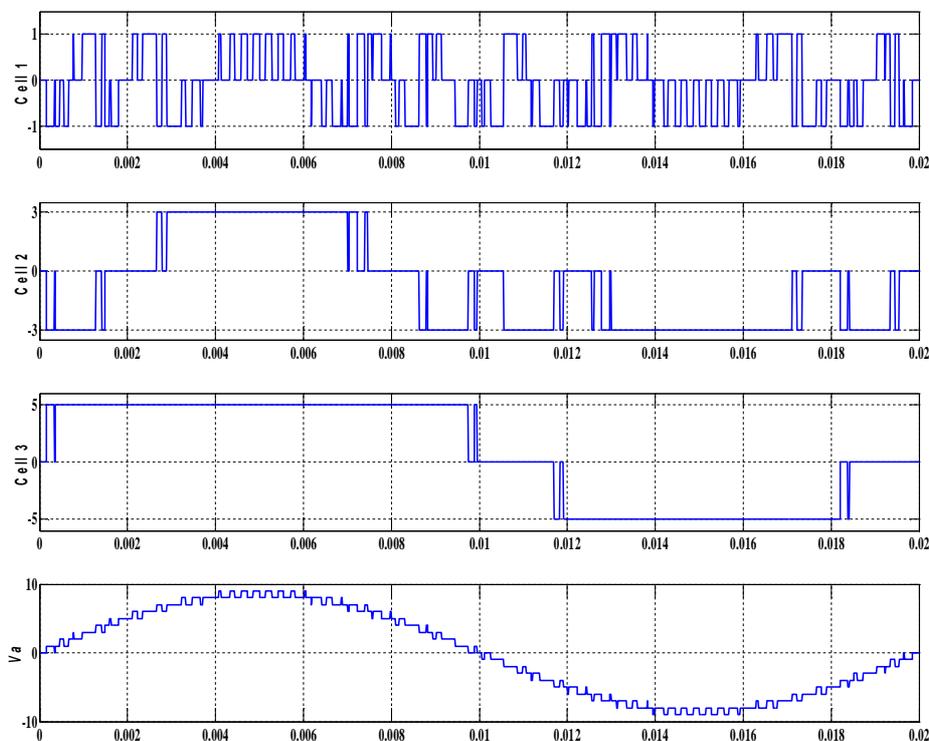


Figure IV.3: Tensions partielles et tension de phase d'un onduleur asymétrique à 19 niveaux avec  $u_{d1} = 1$ ,  $u_{d2} = 3$  et  $u_{d3} = 5$

### IV.3. Commande par mode glissant : concepts de base

#### IV.3.1. Systèmes à structures variables

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à l'autre à tout instant. Dans les systèmes à structures variables avec mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface (hyperplan), puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est dite surface de glissement et le mouvement le long de laquelle il se produit, est dit mouvement de glissement [79], [80], [81]. Le système à structure variable admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\dot{x} = \begin{cases} f_1(X) & \text{Si la condition 1 est vérifiée} \\ \vdots & \vdots \\ f_n(X) & \text{Si la condition n est vérifiée} \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

Où  $X$  est le vecteur d'état et les fonctions  $f_n$  appartiennent à un ensemble de sous systèmes de classe  $C_1$  au moins, et appelées *structures*. En effet, il y a commutation entre ces *différentes structures* suivant la condition vérifiée.

L'étude de tels systèmes présente un grand intérêt, notamment en physique, en mécanique et en électricité. Cela grâce aux propriétés de stabilité que peut avoir le système global indépendamment de celles de chacun de sous système  $f_n(X)$  pris seul [10]-[82]. Les circuits de conversion de puissance constituent un exemple pratique d'un système à structure variable. En effet, pour chaque position de l'interrupteur, le système est gouverné par un système d'équations différentielles.

#### IV.3.2. Théorie des modes glissants

Les systèmes à structure variable sont caractérisés par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation appropriée. Ce choix assure à tout instant la commutation entre ces structures. La combinaison des propriétés de chacune de ces structures permet d'imposer le comportement désiré au système global [83].

Comme il a été présenté précédemment, la commande par le mode glissant est un cas particulier de la commande à structure variable appliquée à des systèmes décrits par l'équation suivante (on se limite au cas  $n=2$ ) :

$$\dot{x} = f = \begin{cases} f^+(x, u^+) & \text{Si } S(x, t) > 0 \\ f^-(x, u^-) & \text{Si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

Les champs de vecteurs  $u^+$  et  $u^-$  sont définis par :

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{Si } S(x, t) > 0 \\ u^- & \text{Si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

Où  $S(x, t)$  est la fonction de commutation (surface).

La surface de commutation  $S_0$  est définie comme suit :

$$S_0 = \{x(t) / S(x, t) = 0\} \quad (\text{IV.14})$$

Ici, on a choisi une surface de glissement sur laquelle le système commute ; c'est la surface sur laquelle le système suit l'évolution désirée. Les trajectoires associées à la fonction  $f$  se résument en trois configurations où sont décrites les évolutions temporelles :

- La première configuration représente des trajectoires de  $f^+$  et  $f^-$  qui mettent en évidence un phénomène de répulsion de celles-ci vis-à-vis de la surface de commutation  $S_0$ .
- La deuxième configuration représente des trajectoires où il existe des phénomènes d'attraction pour  $f^+$  (respectivement pour  $f^-$ ) et de répulsion pour  $f^-$  (respectivement pour  $f^+$ ).
- La troisième configuration (Figure (IV.4)) représente des trajectoires de  $f^+$  et  $f^-$  qui convergent vers la surface de commutation  $S_0$ , et qui ont la particularité de glisser sur celle-ci. Ce phénomène est appelé 'mode de glissement'.

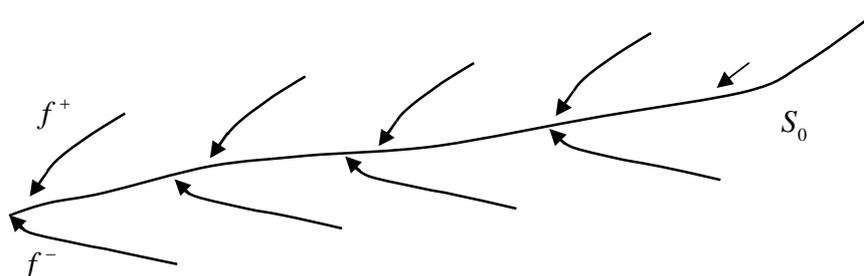


Figure IV.4 : Trajectoires de  $f^+$  et de  $f^-$  pour le mode de glissement.

### IV.3.3. Les modes de la trajectoire dans le plan de phase

La technique de la commande par modes glissant consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de

commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre. Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes figure (IV.5) [80], [81], [84] :

❖ **Mode de convergence (MC)**

La variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation  $S(x, y) = 0$ , ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

❖ **Mode de glissement (MG)**

La variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x, y) = 0$ .

❖ **Mode de régime permanent (MRP)**

Il est nécessaire pour l'étude de la réponse du comportement d'un système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

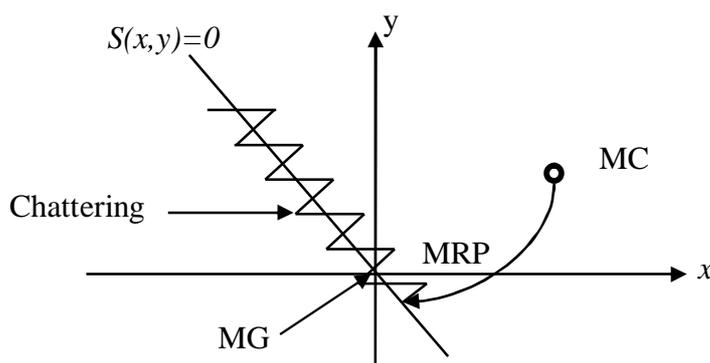


Figure IV.5 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

#### IV.4. Généralités sur la théorie du contrôle par mode glissant

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode glissant, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple ou la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. On l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre réaction d'état.

En fin, la dernière structure est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la « commande équivalente ». Cette dernière structure est retenue pour la suite de notre étude.

#### IV.4.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Cette structure de commande figure (IV.6).est la plus classique et la plus usitée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse [85].

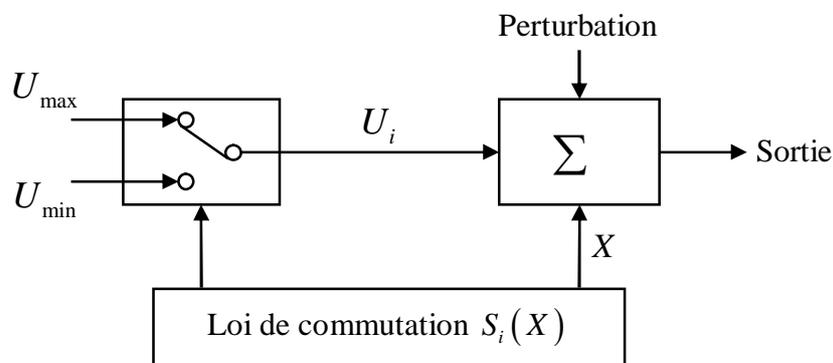


Figure IV.6 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.

#### IV.4.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

Nous pourrions consulter le schéma d'une telle structure sur la figure (IV.7). C'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande de moteurs à courant continu et à aimant permanents, ainsi que dans la commande de machines à induction. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique ou le réglage de la dynamique du système est réalisée par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.

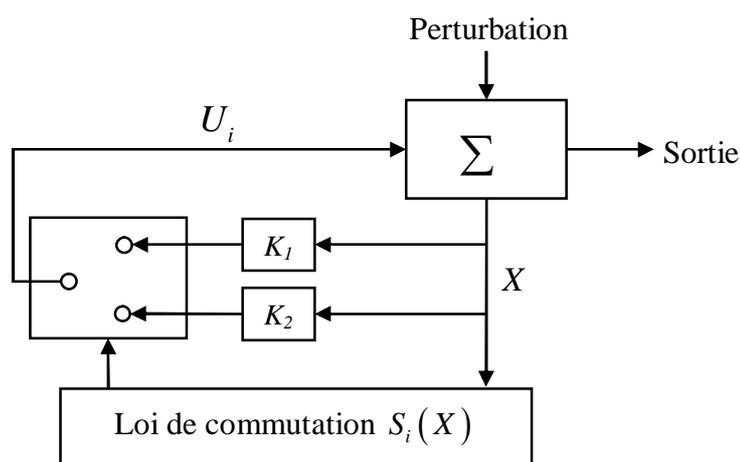


Figure IV.7 : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état.

### IV.4.3. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure (IV.8), présente un réel avantage. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente.

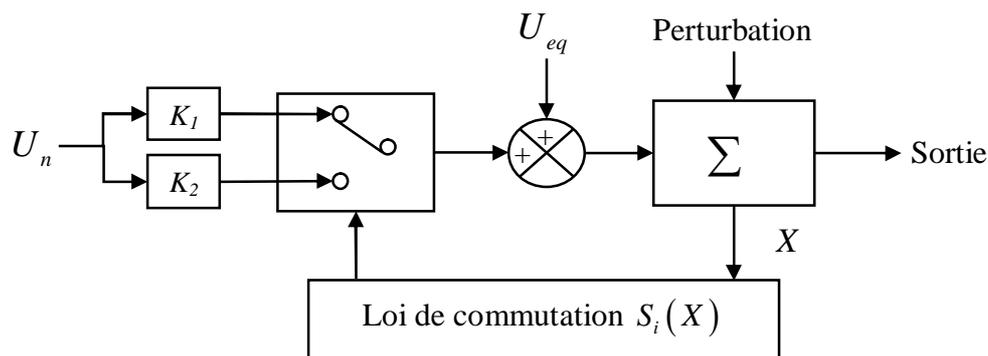


Figure IV.8 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.

Nous avons basé notre étude sur ce type de configuration de la commande, pour plusieurs raisons :

- ✚ une telle structure, de par sa constitution, est très simple et permet de moins solliciter la commande. Il nous semble en effet naturel d'ajouter la commande équivalente pour pré-positionner le système dans un état désiré permanent et stable, et de jouer ensuite sur le terme de commutation pour assurer la convergence vers cet état et pour y rester ensuite ;
- ✚ cette méthode de commande a été déjà abordée dans les travaux antérieurs [86], [87]. Les auteurs mentionnent des résultats très satisfaisants pour des applications robotiques ainsi que des applications utilisant des machines asynchrones ;
- ✚ nous avons voulu placer notre étude dans un cas original en utilisant une structure peu connue et peu usitée.

### IV.5. Conception de la commande par mode de glissement

Les avantages de la commande par mode de glissement sont importants et multiples, comme la haute précision, la stabilité, la simplicité, un temps de réponse très faible et notamment la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour traiter les systèmes à modèle imprécis, dû soit à un problème d'identification soit à un problème de

modélisation. Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence. Dans ce cas, la structure du contrôleur comporte deux parties. Un premier continu représentant la dynamique du système durant le mode de glissement et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette deuxième est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et de perturbation sur le modèle, [80].

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes. Ces étapes concernent [9]:

- Choix de surfaces,
- Etablissement des conditions d'existence de convergence,
- Détermination de la loi de commande.

#### IV.5.1. Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme nécessaires. Ces deux facteurs sont en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante [88] :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(X, t) + g(X, t).u(t) \\ y = C'X, \quad y \in R^m \end{cases} \quad (\text{IV.15})$$

$x \in R^n$  est le vecteur d'état du système,

$u \in R^m$  est le vecteur de commande,

$f(x, t)$  et  $g(x, t)$  sont deux fonctions non linéaires continues et incertaines supposées bornées.

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que l'erreur sur la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi, la surface représente le comportement dynamique désiré. Nous trouvons dans la littérature de différentes formes de la surface, dont chacune donne de meilleures performances pour certaines utilisations. *J. Slotine* propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée:

$$S(X) = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(X) \quad (\text{IV.16})$$

Avec

$e(X)$  Écart sur les variables à régler ;  $e(X) = X^* - X$   $e(X) = X^* - X$  ;



Autrement dit, nous avons :

$$\dot{S}(X).S(X) < 0 \quad (\text{IV.19})$$

Dans cette condition, il faut introduire pour  $S(X)$  et sa dérivée  $\dot{S}(X)$ , les valeurs justes à gauches et à droite de la droite de commutation.

#### IV.5.2.2. Fonction de Lyapunov

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive ( $V(X) > 0$ ) pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction ( $\dot{V}(X) < 0$ ). L'idée est de choisir une fonction scalaire  $S(X)$  pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de construire une commande «  $U$  » tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov.

En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(X) = \frac{1}{2} S^2(X) \quad (\text{IV.20})$$

Et sa dérivée par :

$$\dot{V}(X) = S(X)\dot{S}(X) \quad (\text{IV.21})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$\dot{S}(X).S(X) < 0 \quad (\text{IV.22})$$

L'équation (IV.22) signifie que le carré de la distance vers la surface mesuré par  $S^2(X)$  diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface dans les deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie [89].

#### IV.5.3. Détermination de la loi de commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants. Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre  $u_{\max}$  et  $u_{\min}$  instantanément (fréquence infinie), en fonction du signe de la surface de glissement (figure

IV.10). Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées « *droutement* » ou « *chattering* » apparaissent dans le mode glissant, [83].

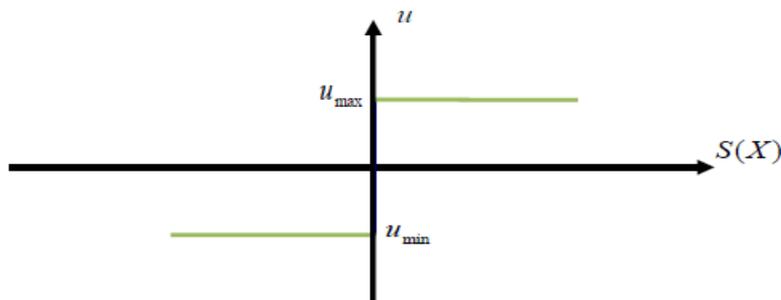


Figure IV.10 : Commande appliquée aux systèmes à structure variable.

### IV.5.3.1. Définition des grandeurs de commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface). C'est pourquoi la surface a pu être déterminée indépendamment de la commande, sur la base du système et des performances désirées (la réciproque n'est pas vraie, et la commande va dépendre de la surface du glissement) [90].

Il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et en suite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence du mode de glissement. L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette constante discontinue est indispensable, elle n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut être, en effet, amenée à réduire autant qu'on veut l'amplitude de la partie discontinue.

En présence d'une perturbation, la partie continue a essentiellement pour but d'un contrôleur par mode glissant se compose de deux parties : une concernant la linéarisation exacte ( $U_{eq}$ ) et l'autre stabilisante ( $U_n$ ).

$$U = U_{eq} + U_n \quad (IV.23)$$

$U_{eq}$  : Correspond donc à la commande équivalente proposée par *FILIPPOV*. Elle sert à maintenir l'état sur la surface de glissement  $S(X) = 0$ . La commande est déduite, connaissant que la dérivée de la surface est nulle  $\dot{S}(X) = 0$ . Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle du signal de commande appliqué sur le système

à commander. Elle peut être interprétée autrement comme une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs  $u_{\max}$  et  $u_{\min}$ .

La commande discrète  $U_n$  est déterminée pour vérifier la condition de convergence (IV.22) en dépit de l'imprécision sur les paramètres et le modèle. Pour mettre en évidence le développement dans le paragraphe précédent, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV.15).

### IV.5.3.2. Expression analytique de la commande

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV.24).

$$\dot{X}(t) = f(X, t) + g(X, t) \cdot u(t) \quad (\text{IV.24})$$

Le vecteur est composé de deux grandeurs :  $U_{eq}$  et  $U_n$ , soit :

$$U(t) = U_{eq}(t) + U_n \quad (\text{IV.25})$$

Avec :

$$\dot{S}(X) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial X} \frac{\partial X}{dt} = \frac{\partial S}{\partial X} \{f(X, t) + g(X, t)U_{eq}(t)\} + \frac{\partial S}{\partial X} \{g(X, t)U_n\} \quad (\text{IV.26})$$

En mode glissant et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro). Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq}(t) = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} g(X, t) \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} f(X, t) \right\}, \quad u_n = 0 \quad (\text{IV.27})$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme  $u_{eq}$  par sa valeur (IV.27) dans l'équation (IV.26). Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(X) = \frac{\partial S}{\partial t} \{g(X, t)u_n\} \quad (\text{IV.28})$$

Le problème revient à trouver  $u_n$  tel que :

$$S(X) \dot{S}(X) = S(X) \frac{\partial S}{\partial t} \{g(X, t)u_n\} < 0 \quad (\text{IV.29})$$

La solution la plus simple est de choisir  $u_n$  sous la forme de relais (figure IV.11). Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$u_n = K \cdot \text{sign}(S(X)) \quad (\text{IV.30})$$

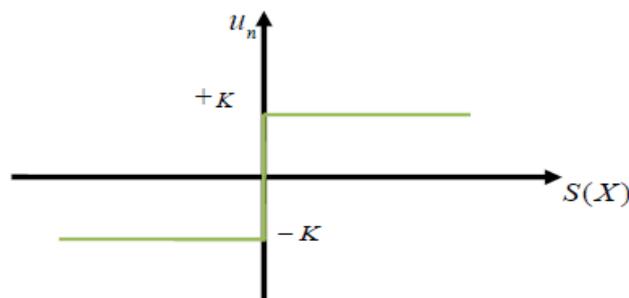


Figure IV.11 : Représentation de la fonction "sign".

En remplaçant l'expression (IV.29) dans (IV.30), on obtient :

$$S(X)\dot{S}(X) = \frac{\partial S}{\partial t} g(X,t) K |S(X)| < 0 \quad (\text{IV.31})$$

Où ; le facteur  $\frac{\partial S}{\partial t} g(X,t)$  est toujours négatif.

Le gain  $K$  est choisi positif pour satisfaire la condition (IV.31). Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long, et s'il est choisi très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de chattering), ou même détériorer l'organe de commande.

#### IV.6. Phénomène de broutement " Chattering "

Un régime glissant idéal nécessite une commande de fréquence de commutation infinie. Évidemment, pour une utilisation pratique, seule une commutation à une fréquence finie est possible, ce qui cause un retard entre la mesure de la sortie et le calcul de la commande, qui peut être amplifié si le système présente naturellement des retards ou des dynamiques négligées. Cela conduit le système à quitter la surface de glissement sans que la commande ne puisse réagir, puis, une fois le signe de la commande inversé, à revenir sur cette surface et passer de l'autre côté, et ainsi de suite. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner des oscillations de haute fréquence de la trajectoire du système autour de la surface de glissement. Ce phénomène est appelé broutement ou "Chattering" en anglais. Les principales causes de ce phénomène sont [91] :

- les retards purs en série avec le système en boucle ouverte (retards inhérents au système, échantillonnage, ... ) ;
- les dynamiques non modélisées des capteurs et des observateurs, qui retardent le moment où le régulateur prend conscience qu'il faut inverser la commande ;

- les dynamiques non modélisées des actionneurs et autres dynamiques rapides du système, qui retardent le moment où la commande est suffisamment forte pour rapprocher le système de la surface de glissement.

Ce phénomène est néfaste pour le bon fonctionnement du système, car il ajoute au spectre de la commande des composantes hautes fréquences. Ces composantes peuvent détériorer le système en excitant les dynamiques négligées lors de la modélisation, ou encore endommager les actionneurs par des sollicitations trop fréquentes, [9].

Dans ce mode la trajectoire d'état n'évolue plus exactement le long de la surface, mais elle tend à osciller au voisinage de celle-ci [92]. Ce phénomène est néfaste pour le bon fonctionnement du système, et il peut servir en plus d'exciter des dynamiques négligées durant la modélisation [10].

Dans le but de réduire ces oscillations, nous proposons une des solutions qui repose sur la variation de la commande  $u_n$  en fonction de la distance entre la trajectoire de la variable à régler et la surface de glissement. Il s'agit d'encadrer la surface par une bande avec un ou deux seuils. Le choix des seuils est directement lié à la précision en boucle fermée [90]. Parmi les méthodes qui réduisent l'effet de la fonction *sign* dans une bande autour de la surface, nous trouvons la commande douce avec la fonction *saturation* « *sat* ». Cette commande est caractérisée par un ou deux seuils. Pour diminuer progressivement la valeur de  $u_n$  en fonction de l'approche de l'état vers la surface dans la région qui encadre cette dernière. La commande varie entre les deux valeurs limites  $\pm K$  suivant une pente entre les deux seuils figure (IV.12) ou dans le cas d'un seul seuil par une pente qui passe par l'origine du plan  $(S(X,t), u)$  figure (IV.13), [10].

Commande douce à deux seuils

$$u_n = \begin{cases} 0 & si \quad |S(X,t)| \leq \zeta_1 \\ |K| \cdot \frac{S(X,t) - \zeta_1 \text{sign}(S(X,t))}{\zeta_2 - \zeta_1} & si \quad \zeta_1 < |S(X,t)| \leq \zeta_2 \\ |K| \text{sign}(S(X,t)) & si \quad |S(X,t)| > \zeta_2 \end{cases} \quad (\text{IV.32})$$

Commande douce a un seul seuil

$$u_n = \begin{cases} |K| \cdot \frac{S(X,t)}{\zeta} & si \quad |S(X,t)| \leq \zeta \\ |K| \text{sign}(S(X,t)) & si \quad |S(X,t)| > \zeta \end{cases} \quad (\text{IV.33})$$

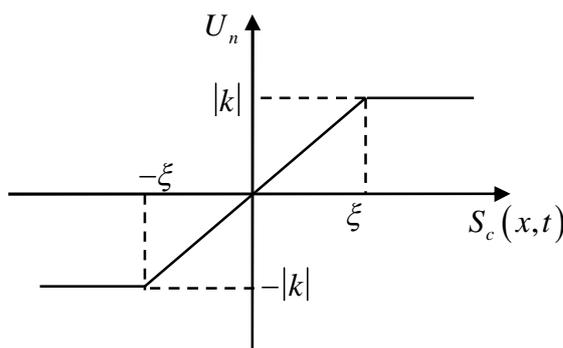


Figure IV.12 : Représentation de la commande douce à un seuil.

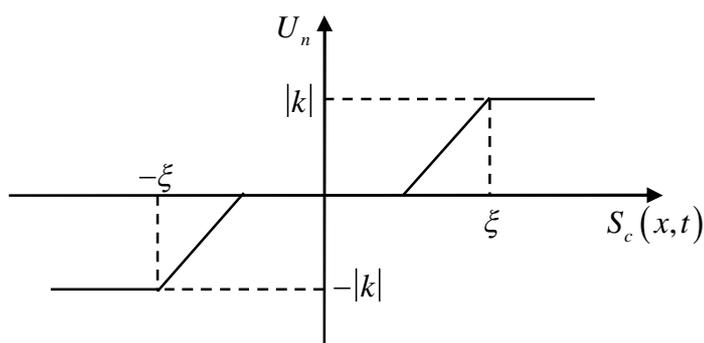


Figure IV.13 : Représentation de la commande douce à deux seuils.

Nous trouvons aussi dans la littérature, un type d'adoucissement de la fonction *sign* selon une fonction régulière (smooth en Anglais), figure (IV.14). La commande est défini par :

$$u_n = \begin{cases} 2 \cdot |K| \cdot \frac{S(X,t)}{\zeta + |S(X,t)|} & \text{si } |S(X,t)| \leq \zeta \\ |K| \cdot \text{sign}(S(X,t)) & \text{si } |S(X,t)| > \zeta \end{cases} \quad (\text{IV.34})$$

Quelque soit la méthode utilisée pour la réduction du phénomène de broutement. Plus les seuils sont augmentés, plus le broutement est réduit et la précision diminue. Il en résulte un écart statique qui est fonction des seuils utilisés. De plus la robustesse est à étudier, car l'insensibilité vis-à-vis les perturbations extérieures et l'invariance vis-à-vis des imprécisions du modèle cessent d'exister.

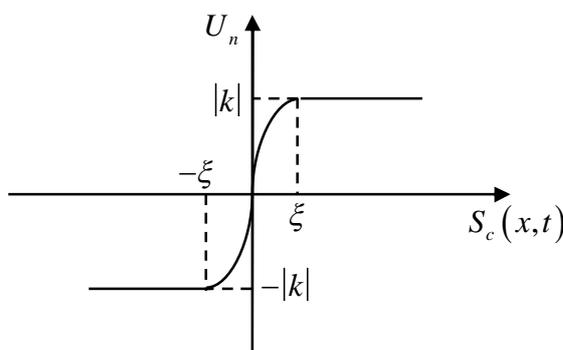


Figure IV.14 : Représentation de fonction Smooth.

### IV.7. Domaine d'application du réglage par mode de glissement

La technique du réglage par mode de glissement a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydraulique ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables : ou complètement ouvertes ou fermées. Ces valves admettent des fréquences de commutation de quelques 10 Hz.

Les entraînements électriques pour les machines électriques, ou robots, entraînements qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position. Dans ce cas le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation).

Il faut mentionner que dans certains domaines tels que : les processus chimique et métallurgiques, où il y'a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions, le procédé par mode de glissement peut apporter plusieurs avantages qui sont :

- Imprécision et variation de paramètres : Problème d'identification.
- Simplification du modèle dynamique du système : Problème de modélisation.
- Robustesse, rejetant la perturbation.
- Le choix de la surface de commutation est assez libre.
- La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente.

Nous pouvons étendre la technique à des surfaces autres que des droites, de dimension quelconques, et à des intersections d'autant de telles surfaces qu'on a des commandes disponibles.

### IV.8. Notes sur l'application du mode glissant à la machine asynchrone à double alimentation

L'orientation du flux statorique a rendu possible d'agir indépendamment sur les puissances active et réactive statoriques par l'intermédiaire des composantes de la tension rotorique  $v_{rd}$  et  $v_{rq}$  respectivement. Ceci simplifie le modèle de la machine asynchrone à double alimentation mais il reste non linéaire. Comme le comportement des systèmes non linéaire est beaucoup plus complexe que celui des systèmes linéaires, une commande non linéaire est souvent nécessaire pour avoir de meilleures performances. La commande par mode de glissement est une des techniques qui s'adapte aussi bien aux systèmes linéaires qu'aux systèmes non linéaires [92]. Les avantages de la commande par mode de glissement

sont importants, bien connus et appréciés depuis le début des années quatre-vingt. Ce type de commande permet une très haute précision, une bonne stabilité, une simplicité de conception, un temps de réponse très faible et notamment la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté au traitement des systèmes dont les modèles sont imprécis. Cette imprécision peut être due à deux raisons:

- Imprécision due aux variations paramétriques (problème d'identification).
- Imprécision due à la simplification du modèle dynamique du système.

Il faut signaler aussi la simplicité de la mise en œuvre, l'adaptation, aussi bien aux processus linéaires qu'aux non linéaires. Ce type de commande peut être également utilisé d'une manière tout à fait analogue non seulement en régulation, mais aussi dans les problèmes d'observation [9].

## IV.9. Application du réglage par mode de glissement pour la régulation des puissances statorique active et réactive de la GADA

### IV.9.1. Contrôle des puissances active et réactive

Pour contrôler la puissance active et réactive, nous prenons  $r = 1$ . Les expressions des surfaces de contrôle des puissances active et réactive ont pour formes [93] :

$$\begin{cases} S_P = P_s^* - P_s \\ S_Q = Q_s^* - Q_s \end{cases} \quad (IV.35)$$

$P_s^*$  et  $Q_s^*$  sont successivement les consignes des puissances active et réactive.

La dérivée des surfaces est :

$$\begin{cases} \dot{S}_P = \dot{P}_s^* - \dot{P}_s \\ \dot{S}_Q = \dot{Q}_s^* - \dot{Q}_s \end{cases} \quad (IV.36)$$

Le système d'équations (III.51) montre que les puissances active et réactive peuvent être contrôlées respectivement en fonction des courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$ .

Remplaçant donc dans les équations (IV.36), les puissances  $P_s$  et  $Q_s$  par leurs expressions données par (III.51), on obtient :

$$\begin{cases} \dot{S}_P = \dot{P}_s^* + V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{rq} \\ \dot{S}_Q = \dot{Q}_s^* + V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{rd} - \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (IV.37)$$

Remplaçons les expressions des dérivées de courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$ , tirées des équations (III.53) dans les équations (IV.37), nous trouvons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}_p = \dot{P}_s^* - \frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s} \cdot \frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \cdot \left[ V_{rq} - R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} - g \omega_s \frac{M \varphi_s}{L_s} \right] \\ \dot{S}_Q = \dot{Q}_s^* + \frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s} \cdot \frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \cdot \left[ V_{rd} - R_r I_{rd} + g \omega_s \frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} I_{rq} \right] \end{array} \right. \quad (IV.38)$$

D'après la théorie du mode glissant, nous remplaçons  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  par  $V_{rd}^n + V_{rd}^{eq}$  et  $V_{rq}^n + V_{rq}^{eq}$  dans les équations (IV.38) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}_p = \dot{P}_s^* - \frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s} \cdot \frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \cdot \left[ (V_{rq}^n + V_{rq}^{eq}) - R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} - g \omega_s \frac{M \varphi_s}{L_s} \right] \\ \dot{S}_Q = \dot{Q}_s^* + \frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s} \cdot \frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \cdot \left[ (V_{rd}^n + V_{rd}^{eq}) - R_r I_{rd} + g \omega_s \frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} I_{rq} \right] \end{array} \right. \quad (IV.39)$$

Durant le mode glissant et en régime permanent, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_p = 0, \quad \dot{S}_p = 0 \quad et \quad V_{rq}^n = 0 \\ S_Q = 0, \quad \dot{S}_Q = 0 \quad et \quad V_{rd}^n = 0 \end{array} \right. \quad (IV.40)$$

Nous tirons des équations (IV.38), les expressions des commandes équivalentes  $V_{rd}^{eq}$  et  $V_{rq}^{eq}$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rq}^{eq} = \frac{L_s}{\omega_s \varphi_s M} \dot{P}_s^* + R_r I_{rq} - \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) g \omega_s I_{rd} + \frac{g \omega_s \varphi_s M}{L_s} \\ V_{rd}^{eq} = -\frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{\omega_s \varphi_s M} \dot{Q}_s^* + R_r I_{rd} - \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) g \omega_s I_{rq} + \frac{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \varphi_s}{M} \end{array} \right. \quad (IV.41)$$

D'après l'équation (IV.40), les termes discontinus des tensions  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont donnés par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rq}^n = K_p \cdot \text{sign}(S_p) \\ V_{rd}^n = K_Q \cdot \text{sign}(S_Q) \end{array} \right. \quad (IV.42)$$

$K_p$  et  $K_Q$  sont des gains positifs qui seront calculé par la suite.

### IV.9.2. Détermination des paramètres $K_p$ et $K_Q$

Ces paramètres sont choisis de façon à :

- Assurer la rapidité de la convergence.
- Imposer la dynamique en mode de convergence et de glissement.
- Limiter le courant à une valeur admissible pour un couple maximal.

Si la théorie de stabilité de Lyapunov est utilisée pour assurer l'attractivité et l'invariance de  $S$ , la condition suivante doit être satisfaite :

$$S \cdot \dot{S} < 0 \quad (\text{IV.43})$$

**Condition 1** : Si  $S > 0$  donc  $\dot{S} < 0$

D'après les équations (IV.37) et (IV.39), nous obtenons :

$$\dot{P}_s^* - \frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s} \cdot \frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \cdot \left[ -K_p - R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} - g \omega_s \frac{M \varphi_s}{L_s} \right] < 0 \quad (\text{IV.44})$$

Donc :

$$K_p > - \frac{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{\frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s}} \left[ \dot{P}_s^* \right] - R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} - g \omega_s \frac{M \varphi_s}{L_s} \quad (\text{IV.45})$$

**Condition 1** : Si  $S < 0$  donc  $\dot{S} > 0$

D'après les équations (IV.37) et (IV.39), nous obtenons :

$$\dot{P}_s^* - \frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s} \cdot \frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \cdot \left[ -K_p - R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} - g \omega_s \frac{M \varphi_s}{L_s} \right] > 0 \quad (\text{IV.46})$$

Donc :

$$K_p < - \frac{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{\frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s}} \left[ \dot{P}_s^* \right] - R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} - g \omega_s \frac{M \varphi_s}{L_s} \quad (\text{IV.47})$$

À partir de (IV.45) et (IV.47), nous obtenons :

$$K_P > \left| \frac{\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{\frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s}} \left[ \dot{P}_s^* \right] - R_r I_{rq} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} - g \omega_s \frac{M \varphi_s}{L_s} \right| \quad (IV.48)$$

En utilisant la définition de la surface  $S_Q$  et en suivant les mêmes démarches que pour le calcul du gain  $k_P$ , nous obtenons pour le gain  $K_Q$  l'expression suivante :

$$K_Q < \left| \frac{\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{\frac{\omega_s \varphi_s M}{L_s}} \left[ \dot{Q}_s^* - \frac{\omega_s \varphi_s^2}{L_s} \right] - R_r I_{rd} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} \right| \quad (IV.49)$$

La figure (IV.15) suivante, présente le schéma bloc de la commande des puissances statoriques active et réactive de la GADA par mode glissant.

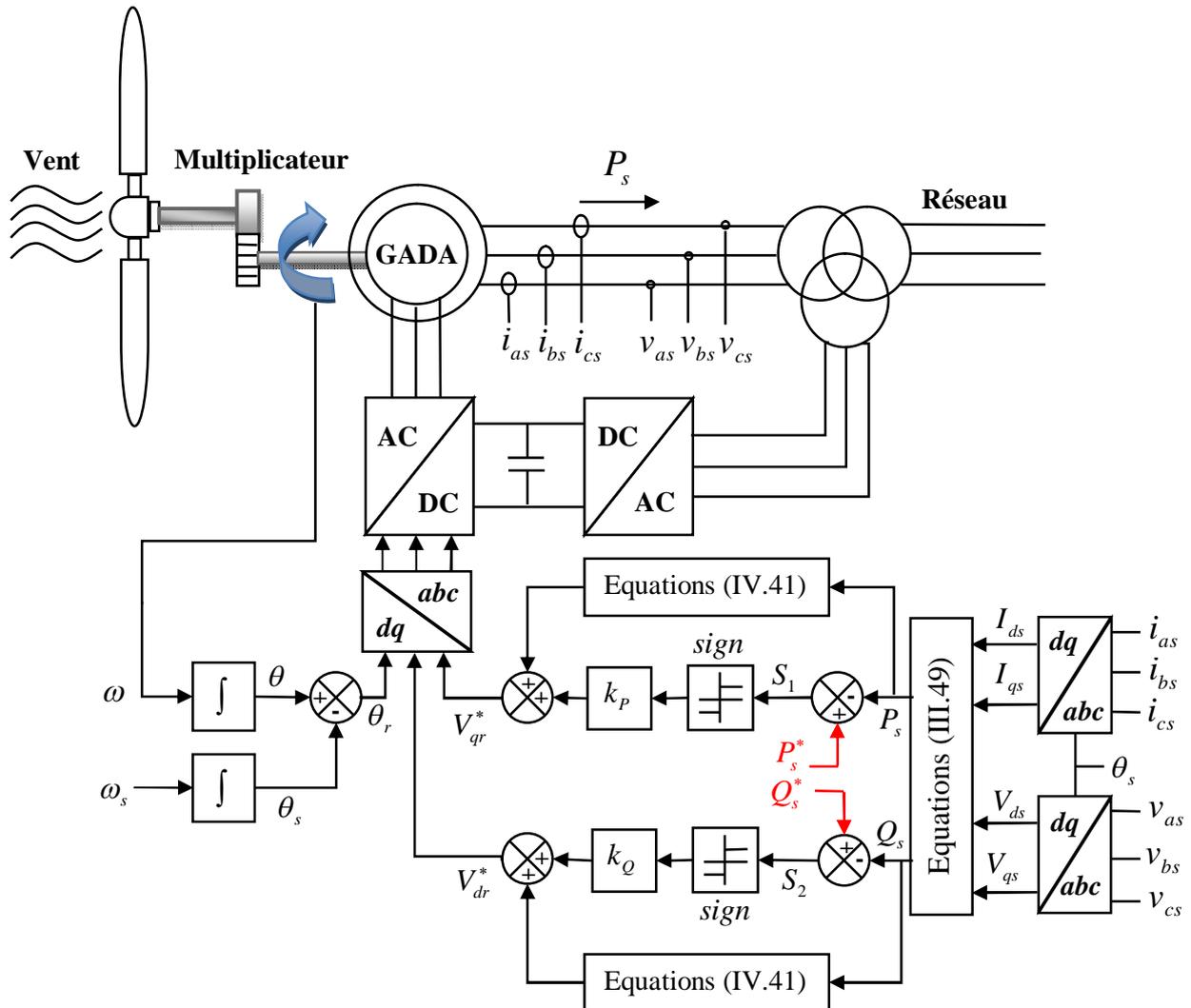


Figure IV.15 : Schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA.

#### IV.10. Le contrôleur de la mode glissant adaptatif

Les principaux obstacles à l'application du contrôle en mode glissant sont deux phénomènes: haute activité d'action du contrôle et chattering. Dans cette section, nous proposons un contrôleur de mode glissant adaptatif dont le gain de commutation est adapté en fonction de l'estimation de perturbation, ce contrôle proposé dans [94]. L'ASMC pourrait être considéré comme une version avancée du contrôle de base en mode glissant qui fait également l'objet de nombreuses études de contrôle avancées. Le schéma de commande ASMC est présenté à la figure (IV.16). Cette méthode est souvent utilisée: dépassement faible, le temps de réglage faible, et robustesse contre la perturbation, réduction phénomène de chattering, aucun besoin de connaissance antérieure de limite d'incertitude, effort minimum de commande. L'entrée de commande dans l'ASMC est donnée dans :

$$V_{com} = V_{eq} + V_{ASMC} \quad (IV.50)$$

$V_{ASMC}$  Est obtenu par:

$$V_{ASMC} = K_{asmc}(t) \text{sat}(S(x)/\delta) \quad (IV.51)$$

Où  $K_{asmc}(t)$  est le gain d'atteinte qui est réalisé par loi d'adaptation :

$$\dot{K}_{asmc}(t) = -\gamma \|s\| \quad (IV.52)$$

Où  $\gamma$  est une constante positive et  $K_{asmc}(t)$  est le gain du contrôleur adaptatif. Cette loi de contrôle fait augmenter  $K_{asmc}(t)$  jusqu'à ce que le système atteigne la tubulure de commutation. Chaque fois que  $S = 0$  n'est pas accessible dans SMC pratique qui cause une augmentation de  $K_{asmc}(t)$  et un gain élevé introduit le chattering.

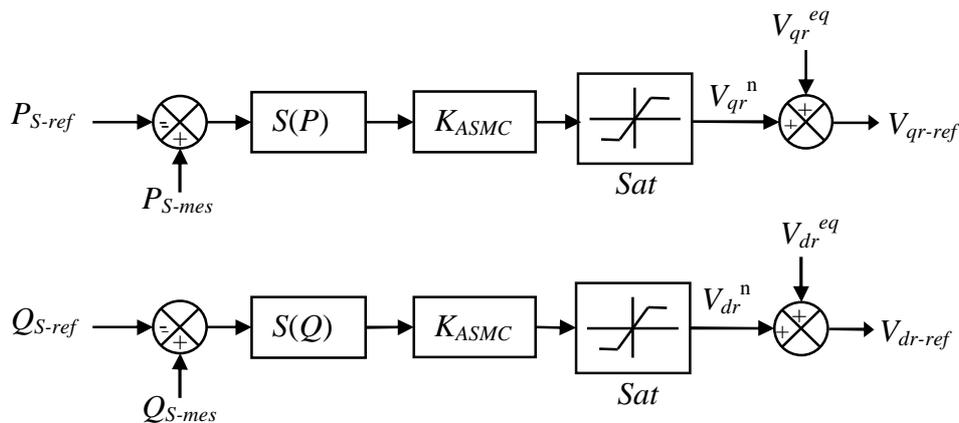


Figure IV.16 : Diagramme du Bloc du contrôle de la mode glissant adaptatif (ASMC).

#### IV.11. Contrôleur de la mode glissant flou adaptatif

On a vu dans des sections précédentes que l'inconvénient majeur de la commande par mode glissant, réside dans la présence du phénomène de chattering. Parmi les solutions utilisées pour l'élimination de ce dernier est l'utilisation de nouvelles techniques telles que la commande par mode glissant adaptatif. Cette dernière a prouvé dans plusieurs travaux et applications de recherches son efficacité dans la minimisation du phénomène en question qui est dû essentiellement à la présence d'un terme de commande discontinu comportant la fonction *sign*.

Dans notre proposition qui permette la combinaison entre la logique floue et le contrôle par mode glissant adaptatif, nous appelons le contrôleur résultant de cette combinaison : contrôleur par mode glissant flou adaptatif, celui-ci présente la même structure de commande par mode glissant adaptatif étudiée dans la section précédente, mis à part les fonctions *sign* existantes dans les termes de commandes (équations (IV.42)), qui seront remplacées par des fonctions floues (voir annexe B). En plus l'avantage de stabilité et robustesse et convergence du système du contrôle est garanti en utilisant la méthode Lyapunov. Ce contrôle qui suit de:

$$V_{com} = V_{eq} + V_{AFSMC} \quad (IV.53)$$

$V_{AFSMC}$  Est obtenu par :

$$V_{AFSMC} = K_{asmc}(t)V_{Fuzzy} \quad (IV.54)$$

$$V_{Fuzzy} = sat(S(x)/\delta) \quad (IV.55)$$

Les régulateurs à base de la logique floue sont des candidats idéaux pour la commande de tels systèmes, malheureusement il n'existe pas de méthodes précises pour la détermination de la stratégie de réglage. Cette dernière doit être construite par tâtonnement à l'aide des tests sur le système à régler. D'un autre côté, ces approches présentent une bonne robustesse aux variations paramétriques et aux bruits de mesure, leurs conditions informatiques, le temps d'élaboration et le besoin de la connaissance expert du système, limitent les applications actuelles à une gamme limitée et parfois bien spécifique.

La majorité des régulateurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani pour les systèmes mono-variables. Ce schéma est représenté comme suit :

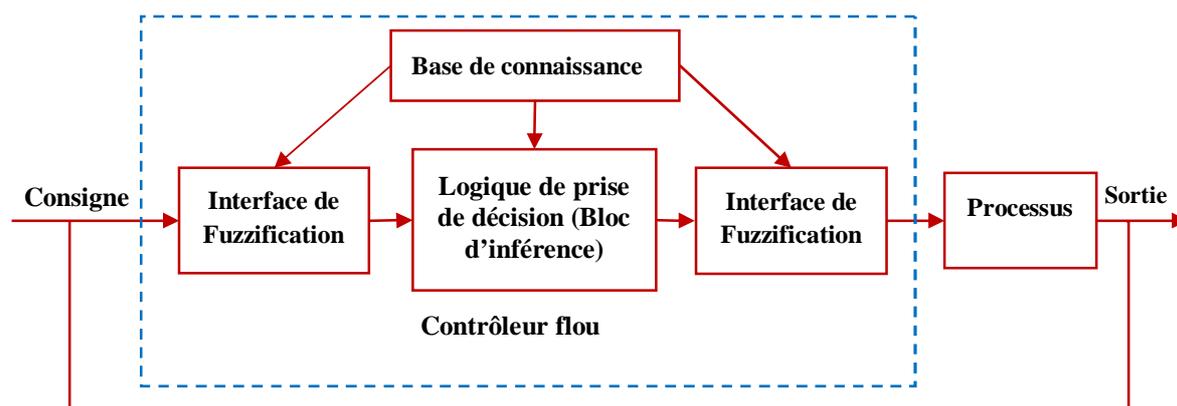


Figure IV.17 : Structure d'un système flou.

Le traitement réalisé par un système d'inférence flou est divisé en trois tâches essentielles [95], [96] :

- **La fuzzification** transforme une valeur numérique de l'entrée en une valeur floue ;
- **L'inférence**, produit l'image de la partie floue issue de la fuzzification par une relation floue  $R$ , généralement construite à partir de règles ;
- **La défuzzification** transforme la partie floue issue de l'inférence en une valeur numérique en sortie. La défuzzification constitue alors une prise de décision.

La mise en œuvre de ces trois étapes de traitement dépend de la nature des sous-ensembles flous utilisés. En d'autres termes, ces sous-ensembles peuvent être de type numérique ou symbolique. De même, la relation floue  $R$  peut être numérique (liant des nombres entre eux), symbolique (liant des symboles entre eux), ou bien hybride (numérique et symbolique).

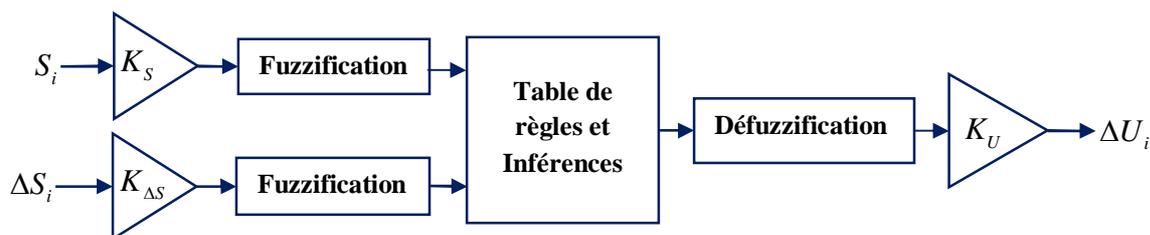


Figure IV.18 : Schéma de principe d'un contrôleur flou.

Où  $K_S, K_{\Delta S}$  et  $K_U$  sont des gains associés à  $S_i, \Delta S_i$  et  $U$  respectivement. En jouant sur ces gains pour assurer la stabilité et établir les performances dynamiques et statiques désirées. L'intervalle d'intérêt de chaque variable linguistique en entrée et en sortie est subdivisé en trois, cinq ou sept classes pour obtenir respectivement neuf, vingt-cinq et quarante-neuf règles. Dans ce travail nous avons mené pour les variables d'entrées et la variable de sortie un régulateur flou sept ensembles, dans le but de trouver les bonnes performances souhaitées

pour le réglage, Les fonctions floues utilisées ayant une entrée Si de sept fonctions d'appartenance et une sortie  $U_i$  de sept fonctions d'appartenance qui sont représentées dans les figures (IV.19).

Les différents ensembles sont notés comme suit :

**NG** : Négatif Grand ; **NM** : Négatif Moyen ; **NP** : Négatif Petit ; **EZ** : Environ Zéro ; **PP** : Positif Petit ; **PM** : Positif Moyen ; **PG** : Positif Grand.

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrées. Elles relient les signaux de sorties aux signaux d'entrées par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience acquise par un opérateur humain. Par exemple, si l'erreur et sa variation sont fortement négatives, alors, le signal de sortie doit être également fortement négatif.

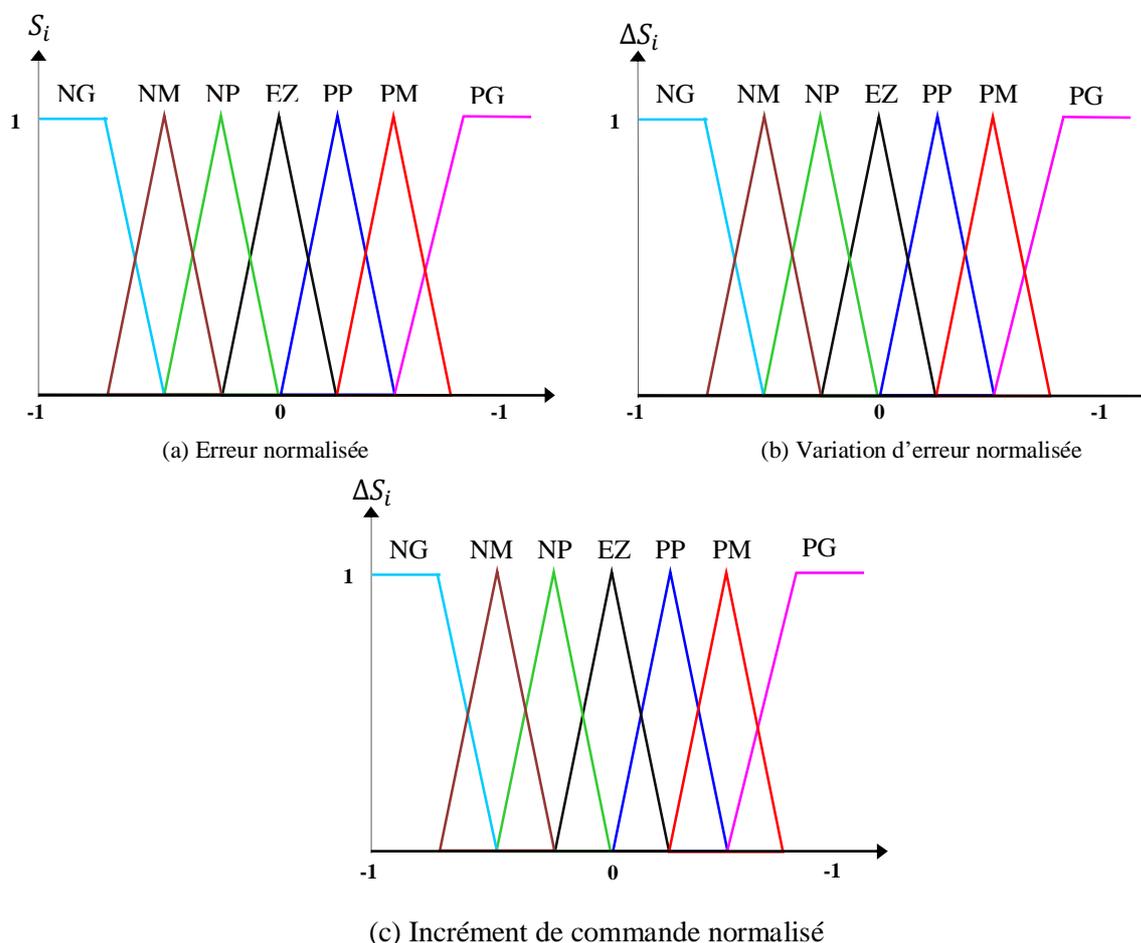


Figure IV.19 : Fonctions d'appartenance des différentes variables linguistiques.

Au contraire, si l'erreur et sa variation sont environ zéro, alors, il sera de même pour la commande. Ces considérations sont représentées dans une matrice dite "matrice d'inférence" (tableau IV.2).

D'après cette matrice, on peut définir les 49 règles, par exemple :

$R_1$  : Si  $S_i$  est *NG* et  $\Delta S_i$  est *NG* Alors  $\Delta U_i$  est *NG*.

$R_{19}$  : Si  $S_i$  est *PP* et  $\Delta S_i$  est *NP* Alors  $\Delta U_i$  est *EZ*.

$R_{41}$  : Si  $S_i$  est *PM* et  $\Delta S_i$  est *PM* Alors  $\Delta U_i$  est *PG*.

$\Delta S_i \backslash S_i$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	EZ
NM	NG	NG	NG	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NG	NM	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG	PG
PG	EZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tableau IV.2 : Table des règles de commandes à sept classes.

La figure suivante, présente le schéma bloc de la commande des puissances statoriques active et réactive de la GADA par mode glissant flou adaptatif.

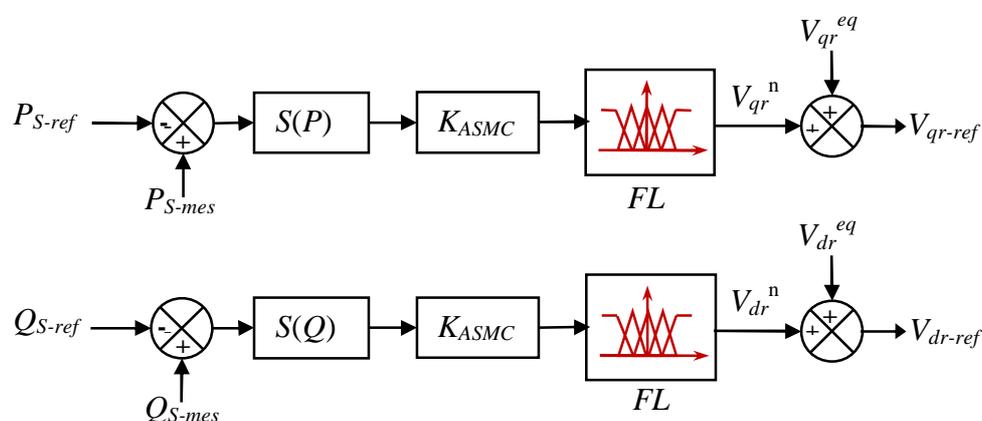


Figure IV.20 : Diagramme du Bloc du Contrôle de la Mode Glissant Flou Adaptatif (AFSMC).

#### IV.12. Résultats de simulation et discussions

Dans cette section nous allons présenter les résultats de simulation par le logiciel Matlab/Simulink de la commande par mode glissant flou adaptatif de la GADA. Une comparaison de cette dernière avec la commande par mode glissant adaptatif classique et celle d'ordre 1 est élaborée dans cette section. Les paramètres de la machine utilisée dans la simulation sont similaires à ceux utilisés dans le chapitre précédent.

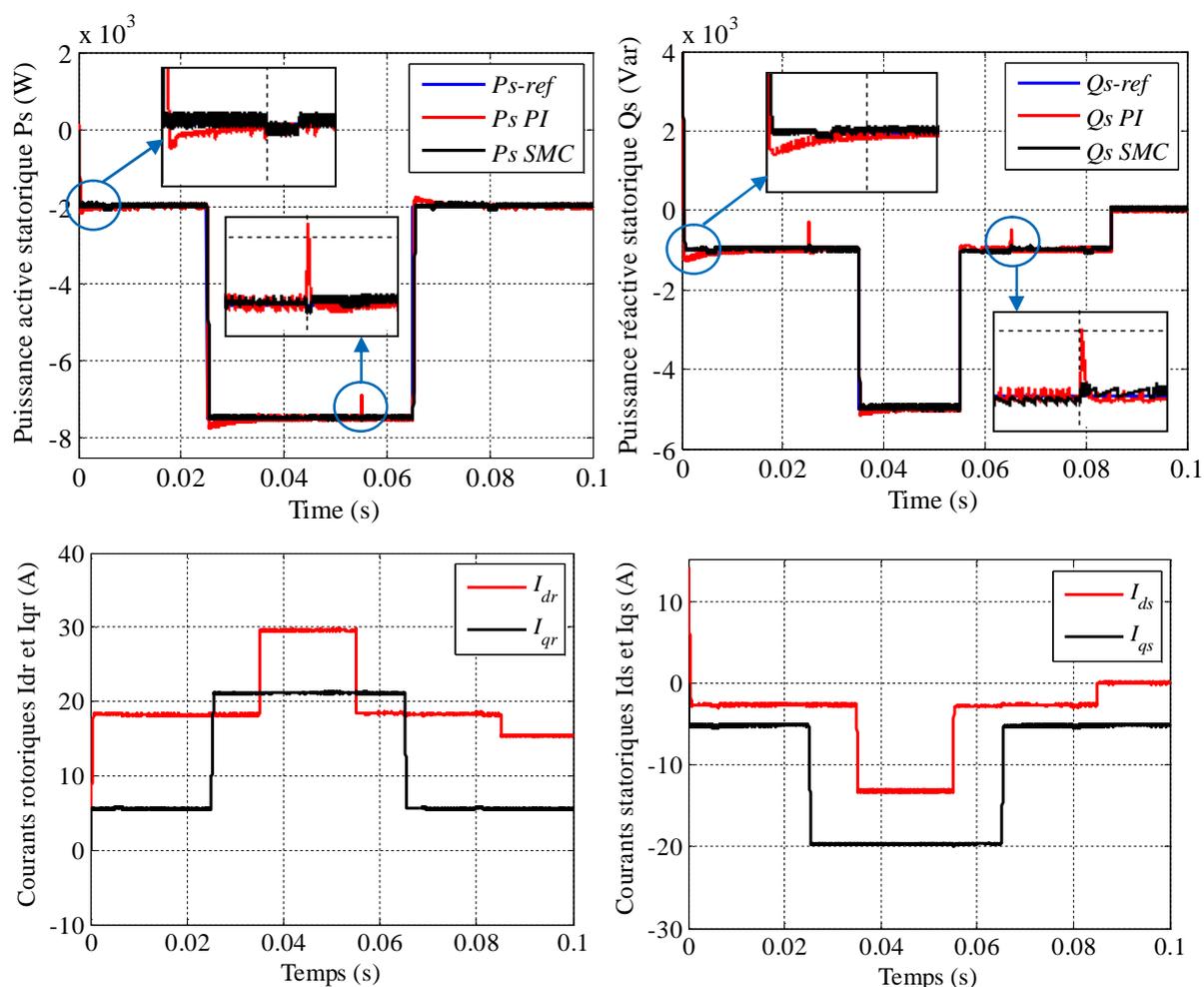
### IV.12.1. Simulation du contrôle des puissances statoriques de la GADA

Ce paragraphe va permettre de tester et de comparer les performances des différents régulateurs par mode glissant étudiés en simulation, utilisés avec le modèle de la machine asynchrone présenté au chapitre 3. Trois catégories de tests ont été effectués, à savoir : suivi de consigne, sensibilité aux perturbations et robustesse vis-à-vis les variations paramétriques. Les consignes de puissances active et réactive utilisées dans les trois tests sont similaires et identiques à celles utilisées dans les simulations précédentes.

#### IV.12.1.1. Suivi des consignes de régulation

Le premier essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée à vitesse fixe.

L'objet principal de ce test est l'étude et la comparaison du comportement des trois types de contrôleurs par mode glissant (SMC, ASMC et AFSMC) utilisés dans ce chapitre vis-à-vis le suivi des consignes de régulation proposées et l'effet du phénomène de chattering sur la qualité du courant sortant des enroulements statorique de la GADA.



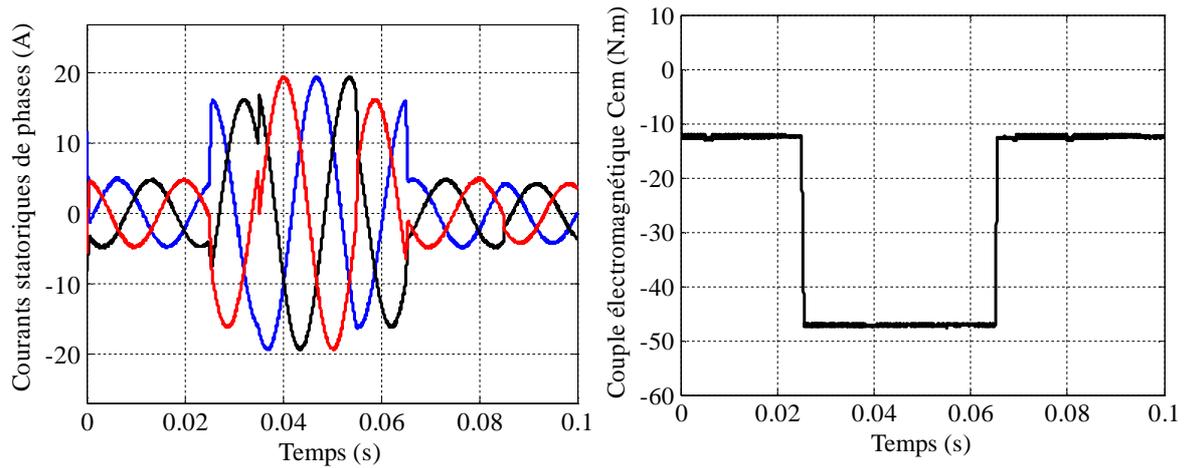
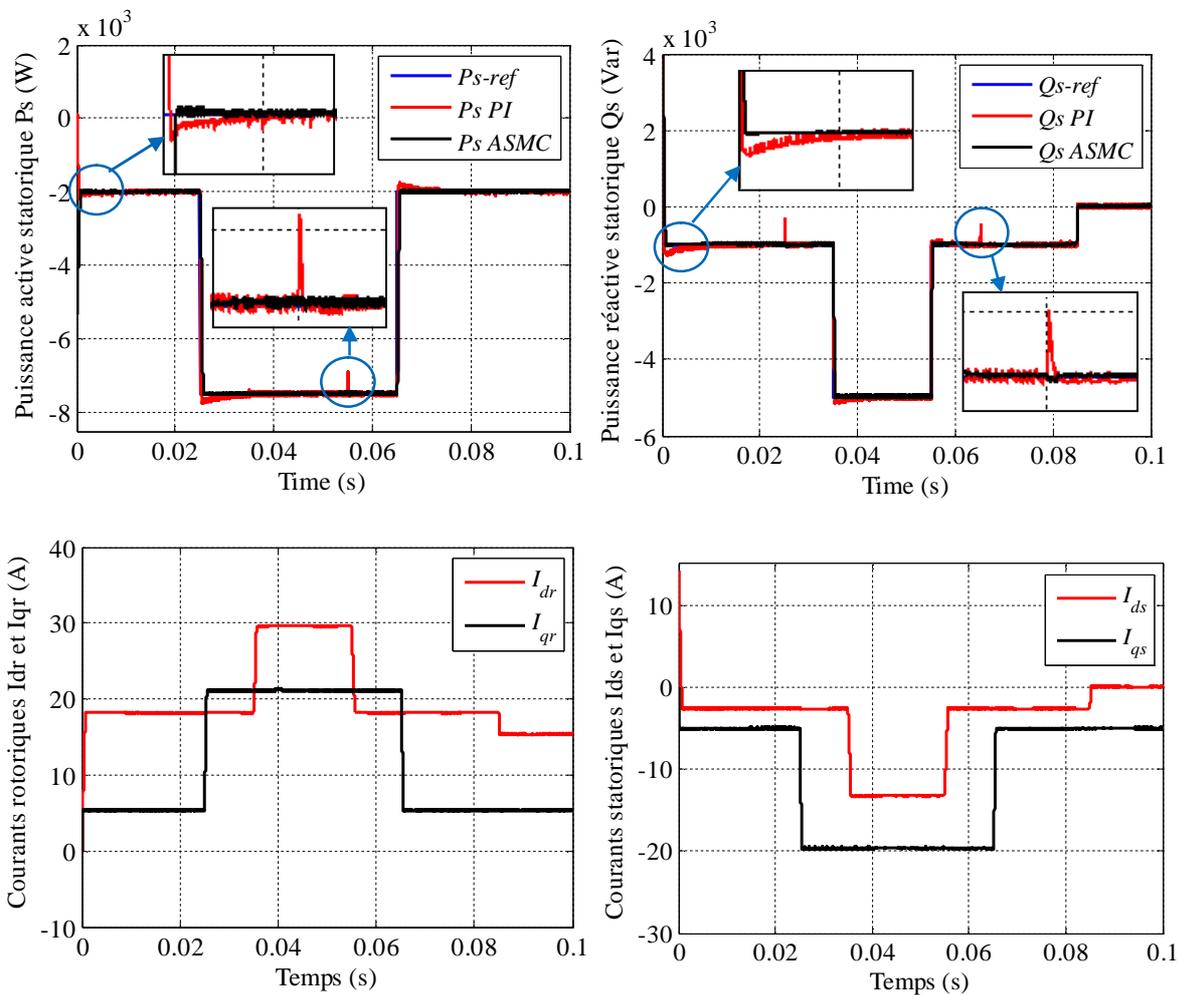


Figure IV.21 : Commande par mode glissant en puissances de la GADA (Test de suivi de consignes).



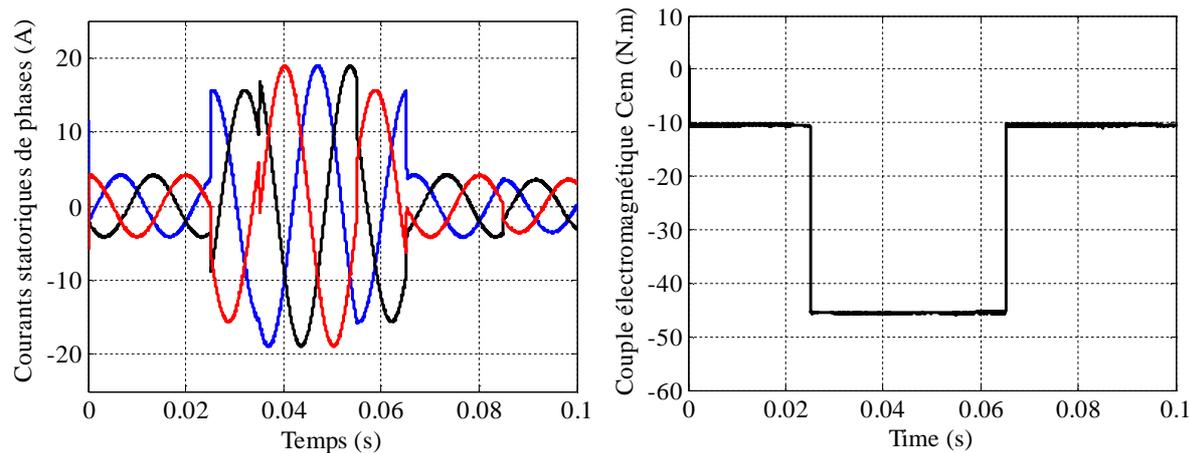
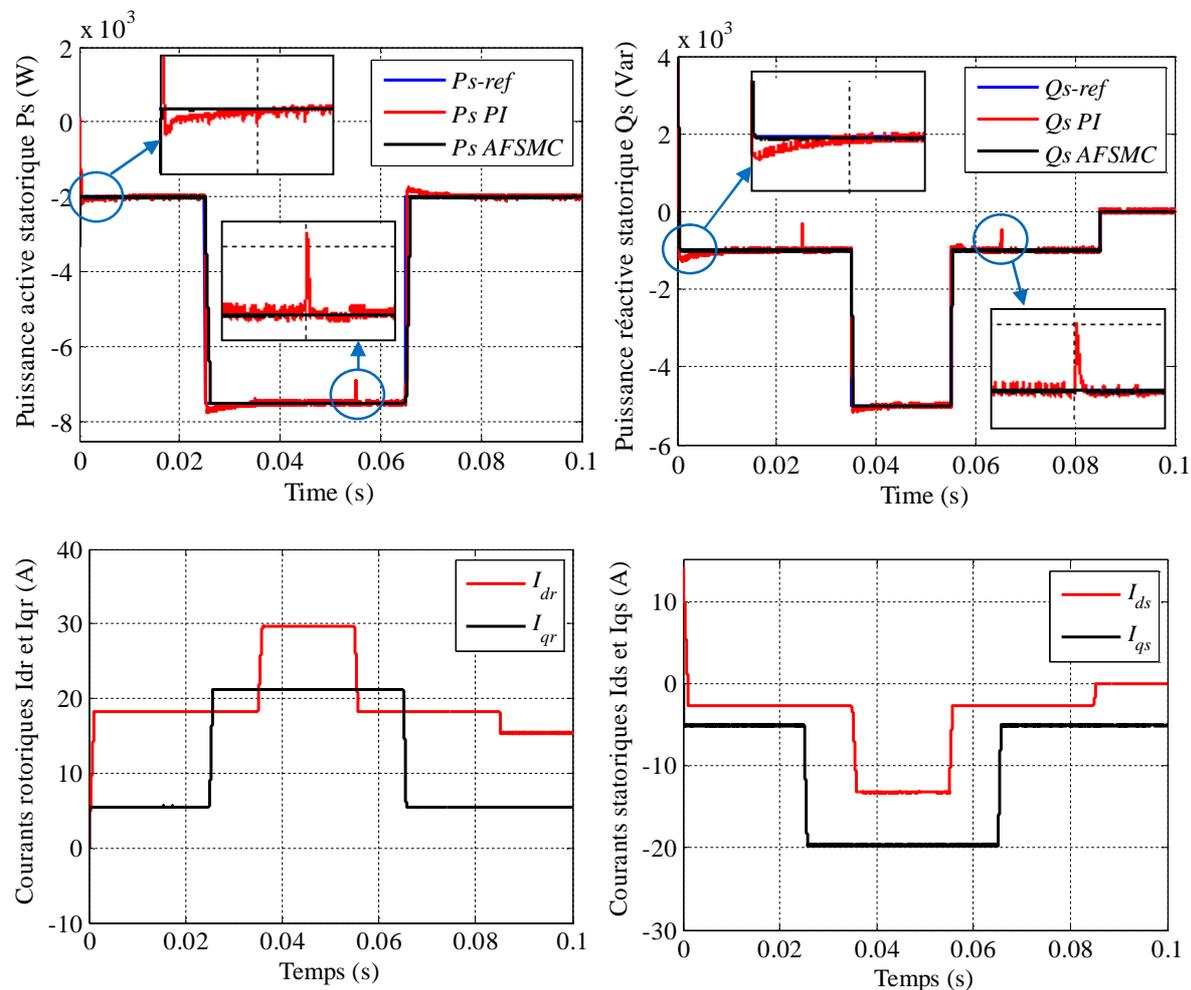


Figure IV.22 : Commande par mode glissant adaptatif en puissances de la GADA (Test de suivi de consignes).



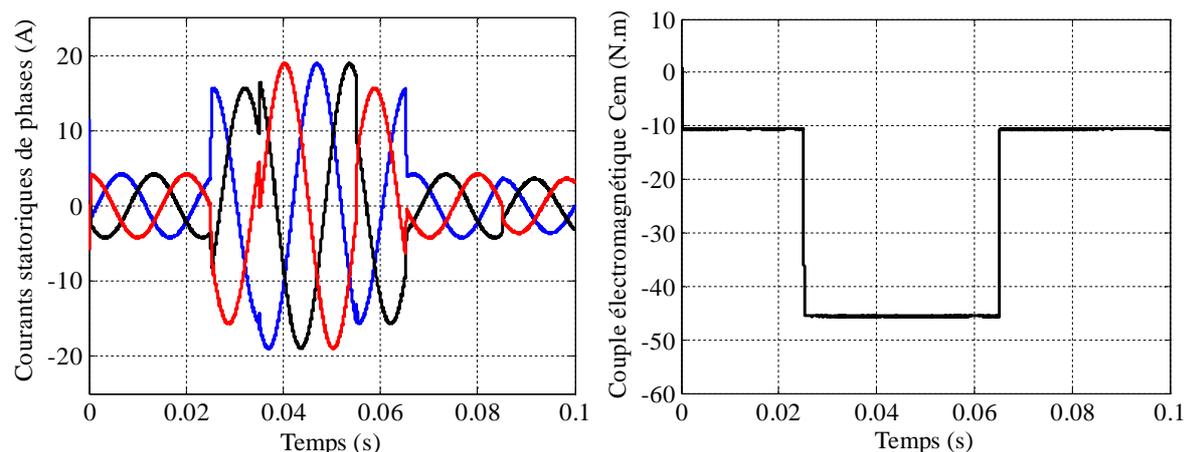
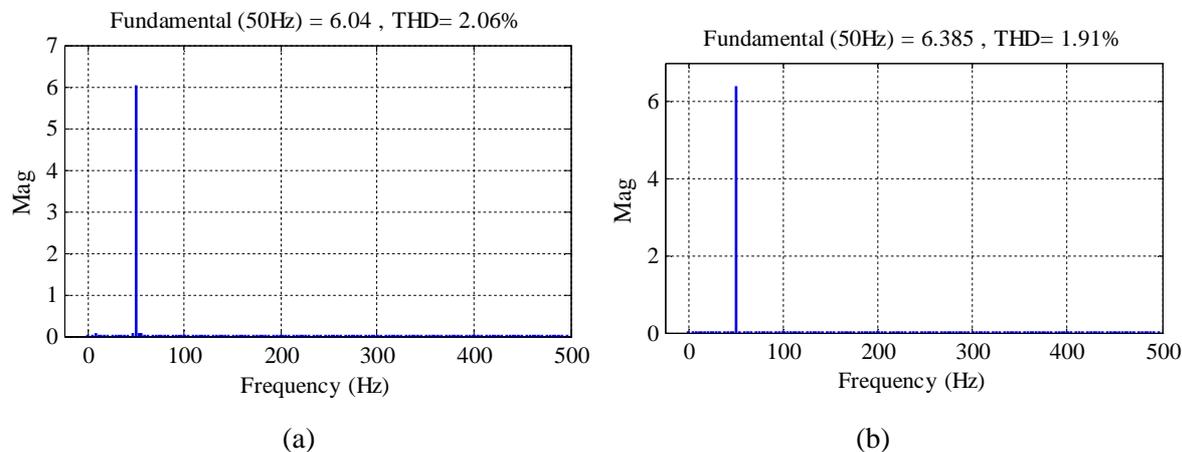


Figure IV.23 : Commande par mode glissant flou adaptatif en puissances de la GADA (Test de suivi de consignes).

Les résultats de simulation obtenus sont montrés par les figures (IV.21), (IV.22), (IV.23) et (IV.24). Comme le montre ces figures, on remarque pour les trois types de contrôleurs utilisés que les puissances actives et réactives mesurées suivent parfaitement leurs références et avec un découplage presque parfait entre les deux axes  $d$  et  $q$ . Nous pouvons également remarquer que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active. Ceci est traduit par sa forme identique à celle de la puissance active. Dans ce cas, nous pouvons conclure que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique ; alors que la puissance réactive est une conséquence de l'excitation du circuit rotorique. Nous constatons aussi que les composantes directes du courant statorique et du courant rotorique ainsi que les composantes en quadratures de ces courants présentent les mêmes allures. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que les courants statoriques de phases ont des formes presque sinusoïdales, ce qui signifie qu'une énergie de bonne qualité est fournie au réseau. Nous pouvons donc considérer que les trois types de contrôleurs ont de bonne performance vis à vis ce test.



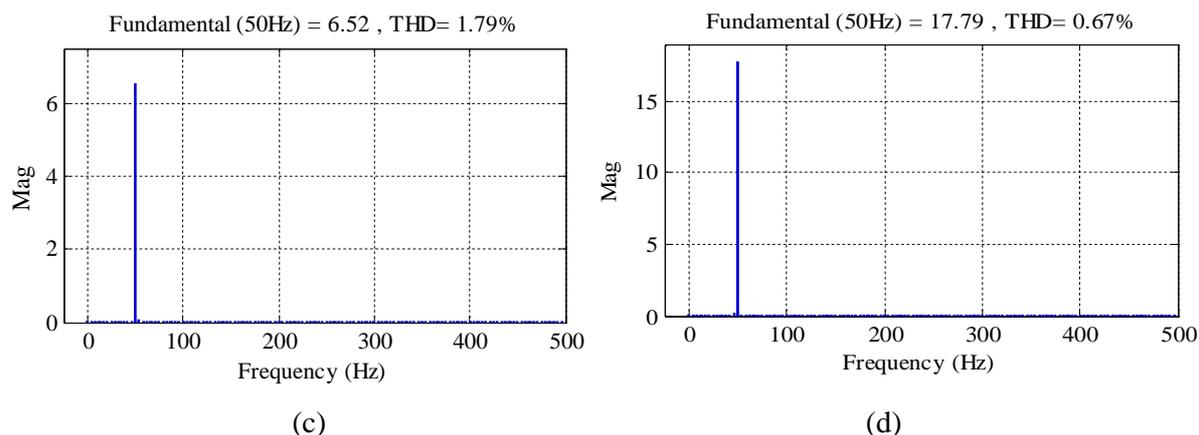


Figure IV.24 : Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique pour :  
 (a) : SMC, (b) : ASMC et (c) : AFSMC utilisée inverter conventionnel.  
 (d) : AFSMC inverter USAMI à 19 niveaux

D'un autre côté, on remarque d'après la figure (IV.24) qui illustre les spectres d'harmoniques d'une phase du courant statorique de la GADA, des trois types de contrôleurs, obtenu en utilisant la transformée de fourrier rapide (FFT) que le taux d'harmonique (THD)

Il est clair que la distorsion harmonique totale (THD) est réduite pour l'AFSMC fourni par USAMI à 19 niveaux (THD = 0.67%) quand a comparé au contrôleur AFSMC (THD = 1.79%) et (THD = 1.91%) et (THD = 2.06%) fourni par inverter conventionnel. Ces résultats nous permettent de conclure que le contrôleur adopté (AFSMC) fourni par 19-niveau USAMI est le plus efficace vis-à-vis la réduction du phénomène de chattering par rapport aux autres contrôleurs.

#### IV.12.1.2. Sensibilité aux perturbations

Cet essai nous permet de vérifier le comportement de la commande en puissances de la GADA par les trois types de contrôleurs par mode glissant étudiées, lorsque la vitesse de rotation de la machine varie. Le profil de la vitesse mécanique de la GADA imposé est similaire à celui utilisé dans le chapitre précédent (figure (III.22)). Les résultats de simulation obtenus sont exposés dans la figure (IV.25).

Cette figure montre que la variation de vitesse de rotation a induit un léger effet sur les courbes de puissances, presque similaire pour les trois types de contrôleurs étudiés, tel qu'ont observe qu'une faible augmentation du temps de réponse est enregistrée sur les courbes des puissances actives et réactives des contrôleurs. Cet effet est instantané et il na pas agit sur le régime permanent des puissances.

Ce résultat est intéressant pour les applications de l'énergie éolienne pour assurer la stabilité et la qualité de l'énergie produite lorsque la vitesse varie.

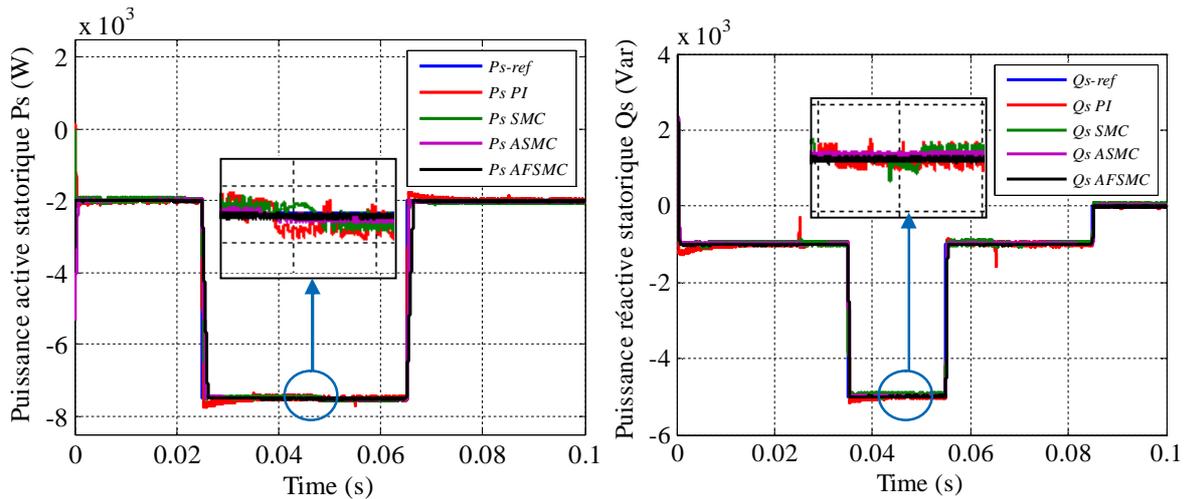


Figure IV.25 : Effet de variation de la vitesse de rotation sur la commande en puissances de la GADA.

### IV.12.1.3. Robustesse

Dans le but de tester la robustesse de la commande par mode glissant flou adaptatif de la GADA, nous avons également étudié l'influence des variations paramétriques sur les performances de la régulation. Une comparaison avec les deux autres types de commandes (SMC et AFSCM) est aussi effectuée dans ce test. A cet effet, les paramètres du modèle de la GADA ont été variés de la même façon que dans le chapitre précédent. Les résultats de simulation obtenus sont illustrés sur les figures (IV.26) et (IV.27), (IV.28) et (IV.29).

D'après ces résultats, on peut remarquer pour les trois méthodes de commande que les consignes de puissances sont toujours suivies par la génératrice, aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant nous constatons que les variations paramétriques ont engendré une légère augmentation de l'erreur statique sur les courbes de puissance réactive obtenues par les trois méthodes, par contre, ces variations ont présenté un effet considérablement faible sur les courbes de la puissance active.

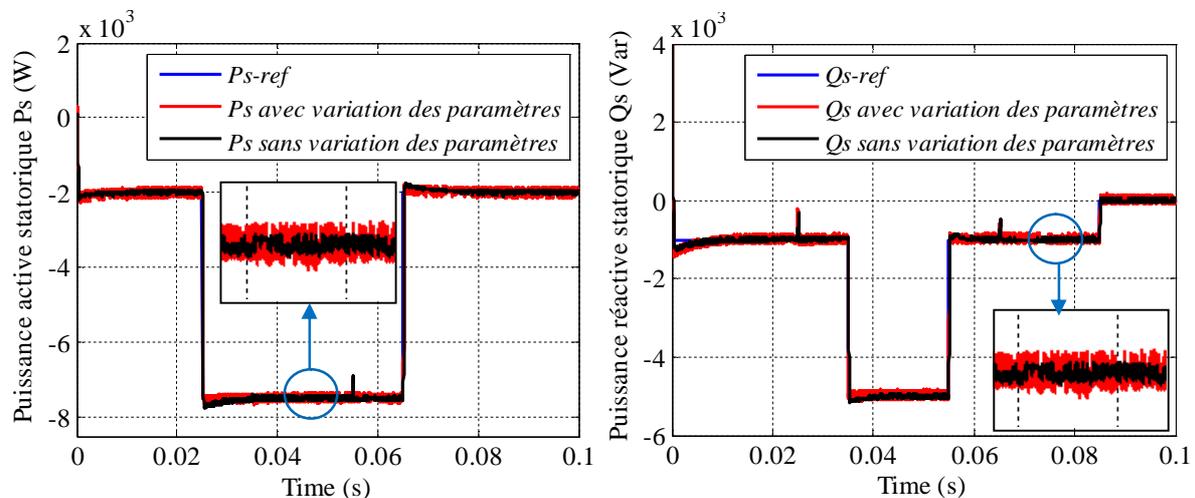


Figure IV.26 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande PI indirecte de la GADA (avant et après les variations paramétriques).

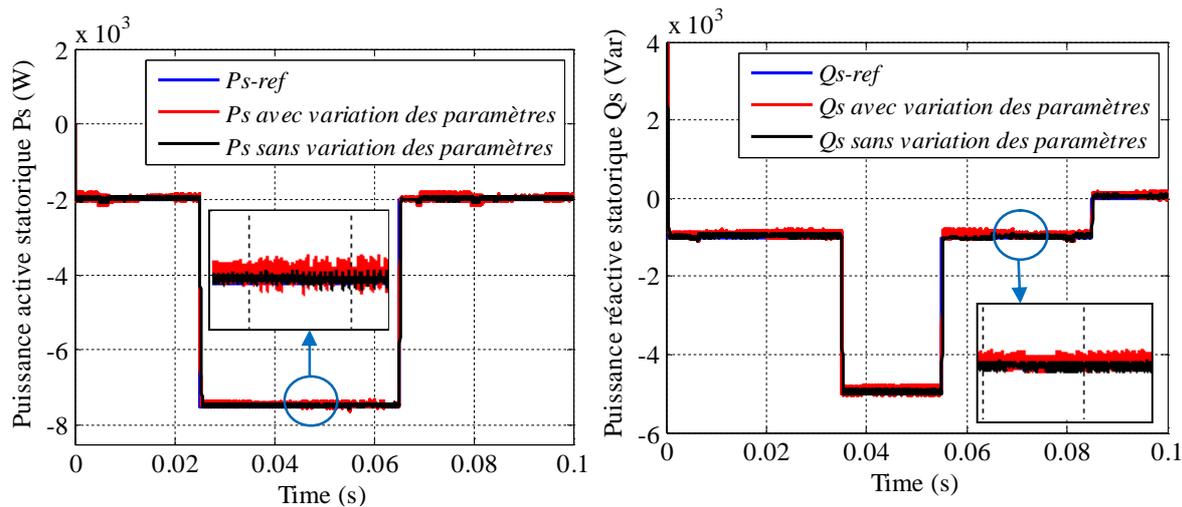


Figure IV.27 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant de la GADA (avant et après les variations paramétriques).

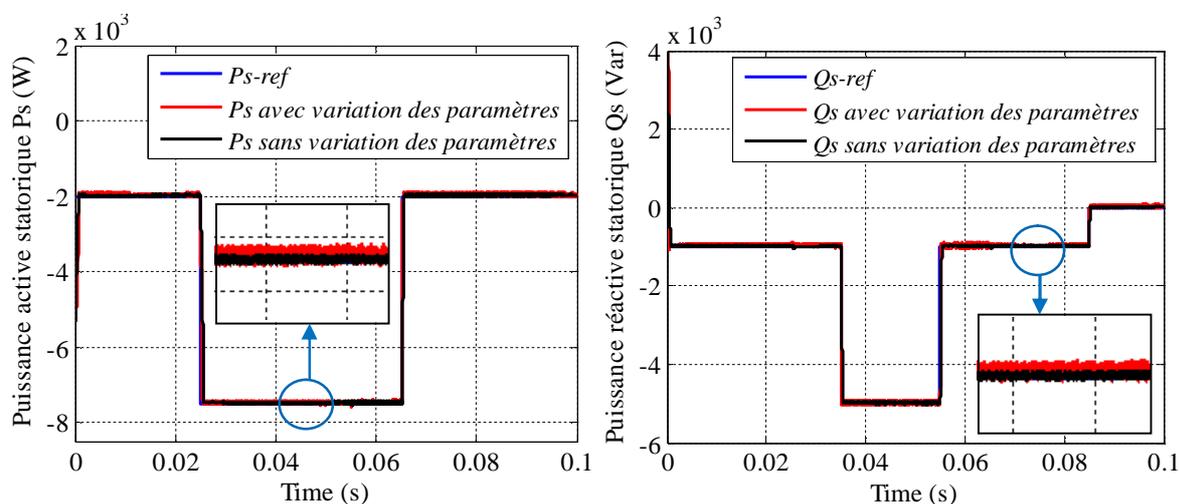


Figure IV.28 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant adaptatif de la GADA (avant et après les variations paramétriques).

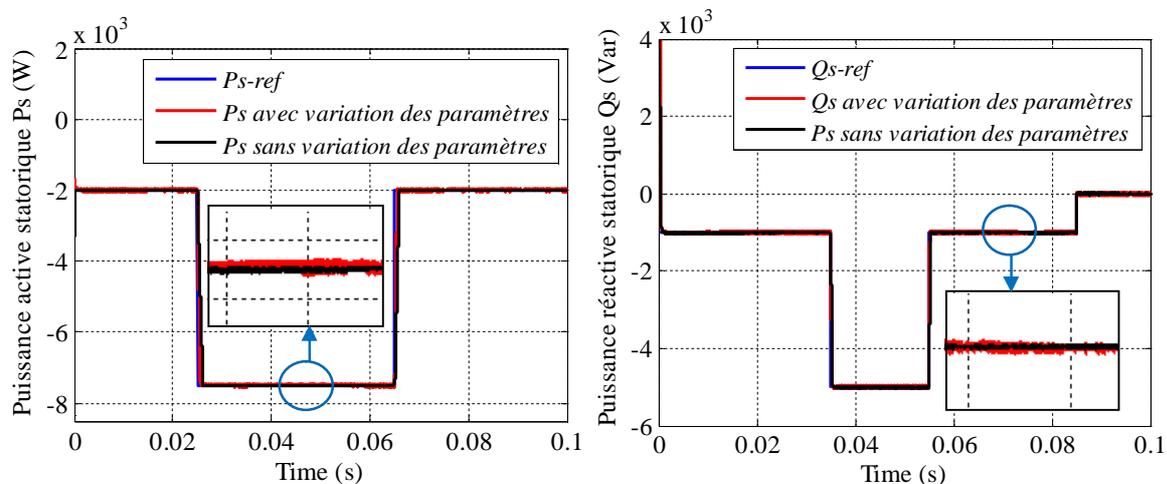


Figure IV.29 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant flou adaptatif de la GADA (avant et après les variations paramétriques).

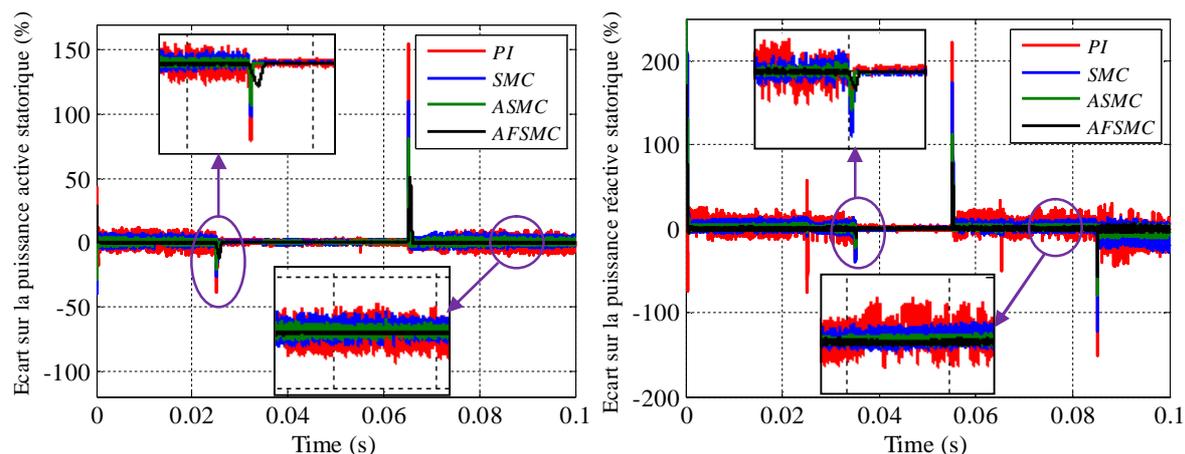


Figure IV.30 : Comparaison des écarts sur les puissances actives et réactives des trois méthodes de commande par mode glissant (PI, SMC, ASMC et AFSCM) de la GADA (test de robustesse).

### IV.13. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir la synthèse de trois contrôleurs non linéaires différents pour la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation utilisée dans un système éolien. Un contrôleur par mode glissant qui a servi de référence de comparaison, un contrôleur par mode glissant adaptatif et un contrôleur par mode glissant flou adaptatif. Le but de ces régulateurs est d'assurer un contrôle robuste de l'échange des puissances actives et réactive entre le stator de la machine et le réseau en modifiant l'amplitude et la fréquence des tensions rotoriques. Les techniques employées ont été testés à la fin de ce chapitre par simulations numériques tel qu'il a été observé que les nouvelles méthodes utilisées dans le but de l'amélioration des performances de la commande par mode glissant d'ordre 1 ont réussi à donner les résultats souhaités représentés par la minimisation du phénomène de chattering dans les grandeurs commandées tout en gardant les qualités et les performances désirées du système.

---

---

# **Chapitre V**

**Etude et commande d'un système  
d'énergie hybride  
éolien/photovoltaïque/diesel**

---

---

## V.1. Introduction

Le prix d'extension du réseau électrique pour les régions isolées et éloignées s'avère prohibitif et excessif ainsi que le surcoût d'approvisionnement en carburant augmente radicalement avec l'isolement. Le recours aux systèmes d'énergie hybrides fait signe aux systèmes de génération d'énergie électrique par combinaison de plusieurs types de sources.

Le développement durable et les énergies renouvelables suscitent aujourd'hui l'intérêt de plusieurs équipes de recherche. Le développement des systèmes d'énergie hybrides éolienne/photovoltaïque représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent et du soleil peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables.

Le changement climatique fait parfois que le système photovoltaïque et éolien est incapable de fournir de l'électricité au consommateur. Le déficit à fournir de l'électricité au consommateur par le système photovoltaïque a incité les chercheurs à trouver des solutions leur permettant d'ajouter d'autres sources d'énergies pour compenser le besoin d'électricité.

Nous avons choisi le diesel et les batteries comme sources de compensation de puissance quand la puissance demandée est plus élevée que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Le diesel est un système fiable de fourniture de l'électricité au consommateur à tout moment, mais en raison de son utilisation d'énergie fossile (carburant) pour la production d'électricité [82], il cause la pollution de l'air, ce qui nous a forcés à utiliser les batteries pour protéger l'environnement.

Dans ce chapitre nous allons apporter des améliorations, la première amélioration est la subordination du système photovoltaïque-éolien-batterie-diesel à un algorithme de supervision et gestion pour une utilisation optimale de l'énergie, protéger les batteries contre les dommages et pour éviter le déficit de la puissance.

## V.2. Caractérisation et tache des systèmes hybrides

### V.2.1. Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides

Afin de résoudre le problème des sources d'énergie renouvelables (la puissance obtenue à partir de ces sources est variable, elle est tributaire aux conditions climatiques), un couplage entre de différents sources d'approvisionnement pour former un système dit système d'énergie hybride.

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est une installation qui associe différentes technologies de la génération d'énergies électriques : sources renouvelables, sources

conventionnelles, dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé. Par exemple, les sources d'ER, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante à cause de leurs natures aléatoires. Cependant l'association de ces dernières avec d'autres sources permet d'obtenir une production électrique continue [97].

Plusieurs sources peuvent être exploitées dans les SEH. Parmi ces sources on peut distinguer les systèmes: photovoltaïque (PV), éolien, diesel, hydraulique, l'énergie contenue dans l'hydrogène (piles à combustible), les systèmes de stockage d'énergie. Ces systèmes peuvent aussi inclure d'autres composants comme les convertisseurs statiques, la charge principale et des charges auxiliaires [97]. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. La figure (V.1) représente un schéma général d'un système hybride [98].

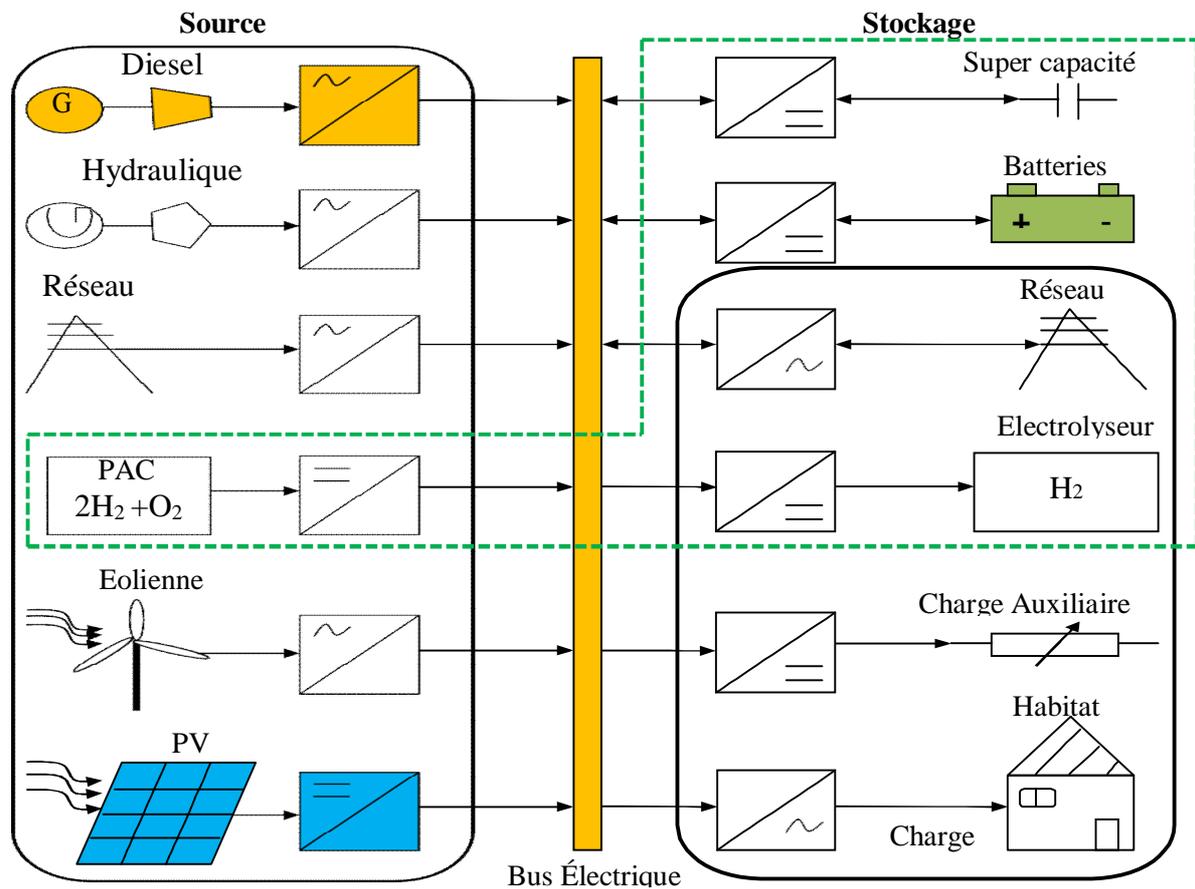


Figure V.1 : Schéma général du système d'énergie hybride.

### V.2.2. Classification des systèmes hybrides

On peut distinguer plusieurs classifications des SEH. Cependant le choix du type des SEH dépend particulièrement des endroits d'installation et des objectifs d'utilisations. Nous représentons ci-après les classifications les plus répandues [99]:

### V.2.2.1. Régime du fonctionnement

Selon le régime de fonctionnement, les SEH peuvent être divisés en deux grandes familles :

#### ✓ **Système d'énergie hybride autonome**

Autonome parce qu'ils génèrent de l'énergie sans connexion ou sans avoir besoin de l'assistance du réseau électrique. Souvent, utilisés pour répondre aux besoins des sites qui sont difficilement accessibles ou n'ont pas d'accès à un réseau électrique (par exemple : refuges de montagne, îles, villages isolés...)

#### ✓ **Système d'énergie hybride connectés au réseau**

L'interface entre le SEH et le réseau électrique peut être constituée par le convertisseur statique 'l'onduleur' pour assurer la conversion de la puissance continue/alternative (DC/AC). L'énergie produite par le SEH est consommée immédiatement. En effet, le surplus d'énergie est injecté vers le réseau, qui agit comme un système de stockage d'énergie. Par conséquent pour ce type de système, il n'est pas exigé l'utilisation de système de stockage puisqu'en cas d'incapacité du SEH pour assurer la demande de la charge, le réseau intervient pour garantir l'énergie nécessaire.

### V.2.2.2. La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

- ❖ Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.
- ❖ Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc. ...
- ❖ La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur

déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc.

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la Figure (V.2).

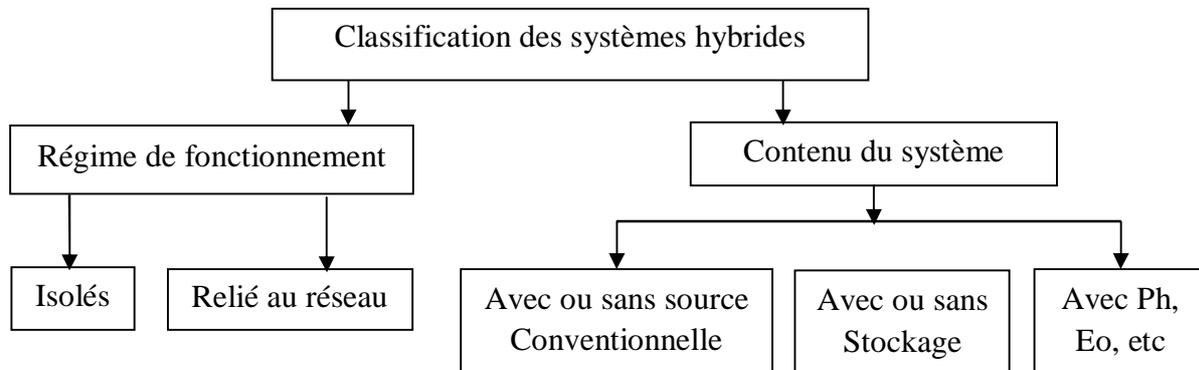


Figure V.2 : Classification des systèmes hybrides.

### V.2.2.3. Gamme de la puissance

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de faible puissance (< 5 kW) généralement alimentent des petites maisons. Par contre, les systèmes plus grands (puissance > 500 kW) sont conçus pour être connectés à de grands réseaux. Le champ d'application des SEH reste très large. Néanmoins, on peut réaliser une classification selon la gamme de puissance présentée au tableau V.1.

Gamme de puissance du SHE	Application
<b>Faible</b> : < 5 kW	System autonome : stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées.
<b>Moyenne</b> : 10 à 250 kW	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales ....
<b>Grande</b> : > 500 Kw	Grands réseaux isolés (ex : réseau insulaires).

Tableau V.1: Classification des SH par gamme de puissance.

### V.3. Architecture Des Systèmes Hybrides

Les différents générateurs d'énergies qui construisent le système hybride peuvent se connecter en plusieurs configurations ce qui rend la topologie du système plus variée selon notre besoin. Trois types d'architectures peuvent exister le plus souvent, une à un bus CC et autre à un bus mixte CA/CC et une autre à un bus CA.

### V.3. 1. Architecture à bus CC

La majorité de ces systèmes de petite puissance présente une structure où le bus CC de la batterie est le point central de connexion. En général, les petites éoliennes produisent de l'électricité en courant alternatif à fréquence variable puis injectée dans le bus CC (au travers d'un convertisseur si nécessaire). Cette énergie est ensuite stockée ou reconvertie en courant alternatif (à amplitude et fréquence fixes) à travers un onduleur pour alimenter la charge. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge. La puissance délivrée peut être contrôlée en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable (Figure (V.3)). Les avantages et les inconvénients d'un tel système sont présentés ci-après.

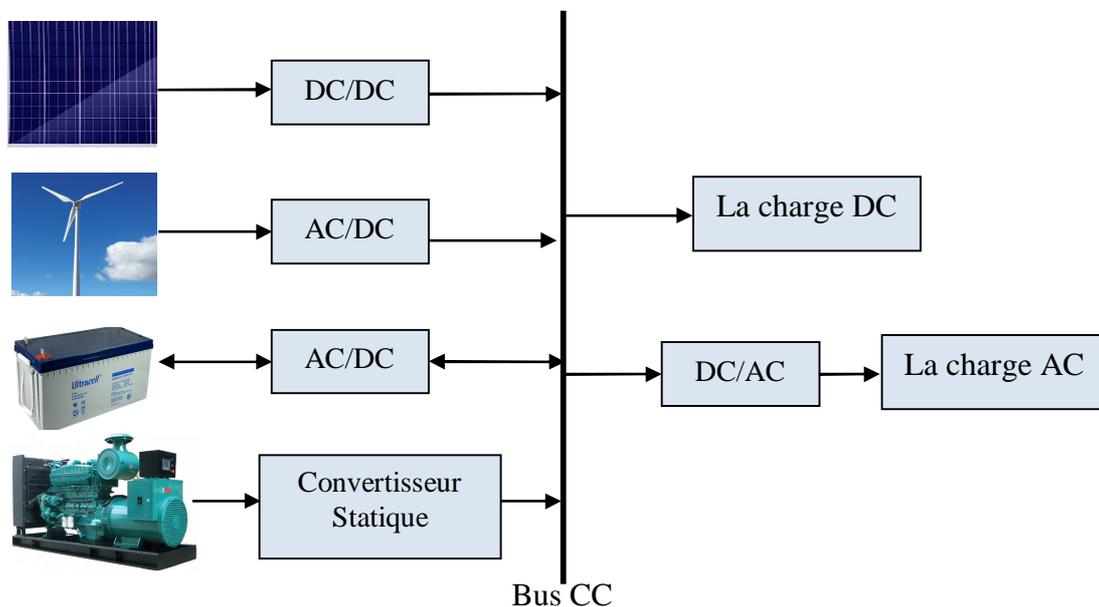


Figure V.3 : Configuration d'un SH à bus à Courant Continu (CC).

#### Avantage

- La connexion de toutes les sources sur un bus CC simplifie le système de commande.
- Les générateurs peuvent être dimensionnés de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75 à 85%.

#### Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

La commande de ces petits systèmes dépend de l'état de charge de la batterie.

Le générateur éolien doit limiter sa tension de sortie et délivrer la puissance produite lorsque la batterie est complètement chargée et ne peut donc plus stocker d'énergie. À l'opposé, l'onduleur et la charge doivent se déconnecter pour arrêter la décharge de la batterie quand la tension atteint un niveau limite inférieur prédéfini. Ces deux propriétés impliquent une conception adaptée du système, optimisant ainsi les ressources énergétiques et conduisant à une quantité minimale d'énergie non fournie.

### V.3. 2. Architecture mixte à bus CC / CA

La configuration à deux bus est présentée dans la Figure (V.4). Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration avec un bus CC. Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter une partie de la charge à courant alternatif directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale de l'onduleur. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion courant continu/courant alternatif (fonctionnement onduleur). Quand il y a un surplus d'énergie, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur). On peut aussi utiliser un convertisseur bidirectionnel mais la commande est alors différente et moins souple.

La faisabilité technique et économique de cette structure est liée aux progrès des convertisseurs statiques et de leur commande. L'avantage principal est la modularité qui permet la connexion et/ou le remplacement de modules de production en cas de besoin de plus d'énergie. L'installation des éléments sur tout le mini-réseau est possible, ce qu'on ne peut pas faire dans le cas d'un bus CC.

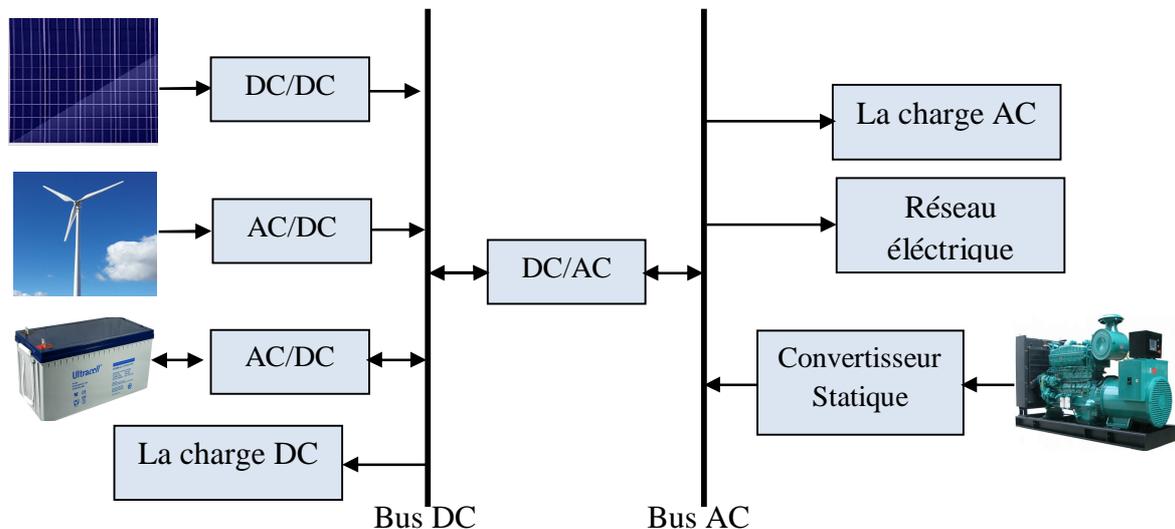


Figure V.4 : Configuration du SH à deux bus à CC et à CA.

### **Avantage**

- Le générateur et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge,
- La possibilité de réduire la puissance nominale du générateur et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

### **Inconvénients**

- Besoin de technologies évoluées, donc chères et des applications difficiles dans des lieux isolés,
- Dans les systèmes fonctionnant avec une forte capacité de stockage, cette topologie présente des niveaux de pertes supérieurs parce que l'énergie de stockage doit passer du point de génération vers le bus à courant alternatif et traverser le convertisseur bidirectionnel qui relie la batterie au système.

Dans le contexte d'un système autonome de petite puissance, on utilise l'architecture à bus à courant continu pour sa simplification et son faible coût.

### **V.3. 3. Architecture à bus CA**

De nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA). Toutes les sources de productions sont reliées au bus CA via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus. Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (Figure. V.5) permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires.

En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

L'utilisation du courant alternatif présente plusieurs avantages et inconvénients :

### **Avantage**

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres ;

- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence du bus (CA) ;
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur) ;
- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement ;
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces ;
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle.

### Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs ;
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande.

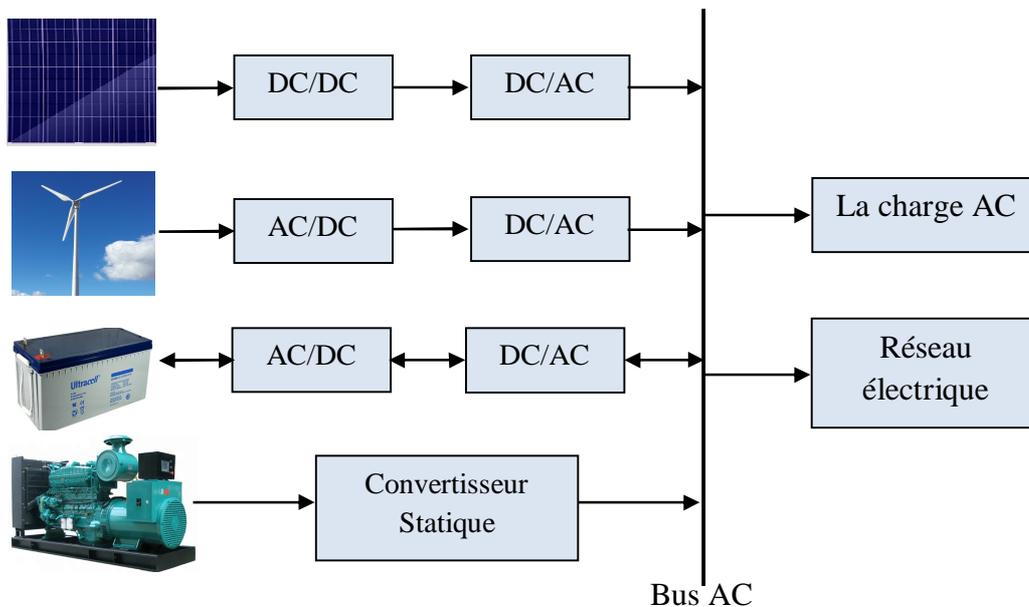


Figure V.5 : Configuration du SH à bus CA.

### V.4. Composants d'un système hybride

Les principaux composants d'un système hybride sont généralement les générateurs éoliens, photovoltaïques et générateurs diesels. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie renouvelable comme l'énergie hydraulique, géothermique, l'énergie contenue dans l'hydrogène (pile à combustible). Les éléments de conditionnement et de conversion d'énergie et le système de stockage d'énergie.

## V.5. Description des composants du système hybride

Le générateur éolien a été décrit aux chapitres précédents. Nous allons définir les autres composants possibles des systèmes hybrides.

### V.5.1. Le générateur photovoltaïque.

#### V.5.1.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode) voir figure (V.6). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -).

Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique [100].

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux.

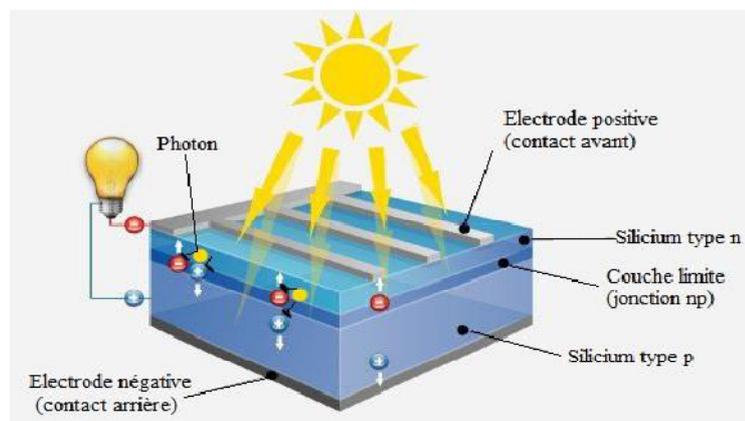


Figure V.6: Schéma d'une cellule solaire.

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devient libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction), c'est l'énergie du " bande gap ", notée  $E_g$  et exprimée en électron-volt ( $eV$ ) (voir figure (V.4)). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur, elle va de 1 à 1,8  $eV$  pour les

applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin, et de 1,7 eV pour le silicium amorphe [101].

Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule. Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite vont libérer un électron négatif, laissant un " trou " positif. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique E, de part et d'autre de la jonction [102].

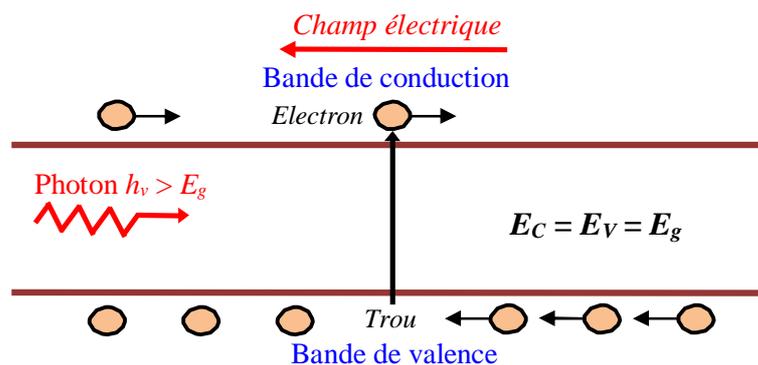


Figure V.7 : Phénomène de conduction dans les matériaux semi-conducteurs.

### V.5.1.2. Le dopage des semi-conducteurs

Un matériau semi-conducteur est un matériau dont la conductibilité électrique peut varier en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve. Afin d'améliorer la conduction de ce dernier, les fabricants injectent dans une plaquette semi-conductrice des matériaux étrangers (impuretés), qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux 4 électrons du semi-conducteur (silicium).

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du dopage par des impuretés. Deux méthodes de dopage sont possibles (voir figure (V.8)) :

- Dopage type P.
- Dopage type N.

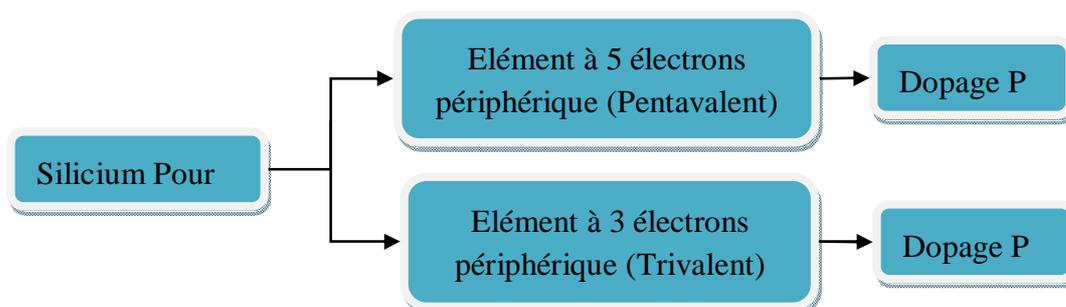


Figure V.8 : Dopage de type N et dopage de type P.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type N et type P) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque [101].

### V.5.1.2.1. Polarisation de la jonction PN

En polarisant électriquement une jonction PN à base de Silicium, on obtient la caractéristique statique  $I_d(V)$  représentée sur figure (V.9) [103].

L'équation qui caractérise le modèle mathématique de la jonction est donnée par :

$$I_d = I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V}{A \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (V.1)$$

Avec :

$I_{sat}$  : Courant de saturation ;

$T$  : Température de jonction (en °K) ;

$A$  : Facteur d'idéalité ;

$q$  : Charge élémentaire de l'électron, égale à  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C ;

$K$  : Constante de Boltzmann, égale à  $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/°K.

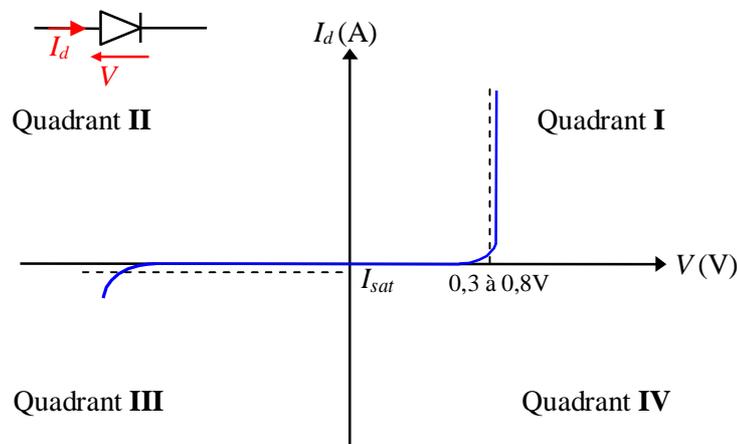


Figure V.9 : Caractéristique d'une jonction PN polarisée.

### V.5.1.2. 2. Jonction PN sous éclaircissement

Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux. Physiquement, cet effet se traduit de deux manières :

- Dans le quadrant III, le système fonctionne en récepteur, c'est la photo-résistance ;

➤ Dans le quadrant IV, le système fonctionne en générateur; c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN.

Le réseau de caractéristiques est alors donné par la figure (V.10). On s'intéresse uniquement au quadrant IV pour la réalisation de générateurs photovoltaïques à partir de cellules photovoltaïques. Pour cela, les caractéristiques sont représentées dans un nouveau repère  $I_p(V_p)$  donné par la figure (V.11) où le courant de saturation inverse est compté positivement.

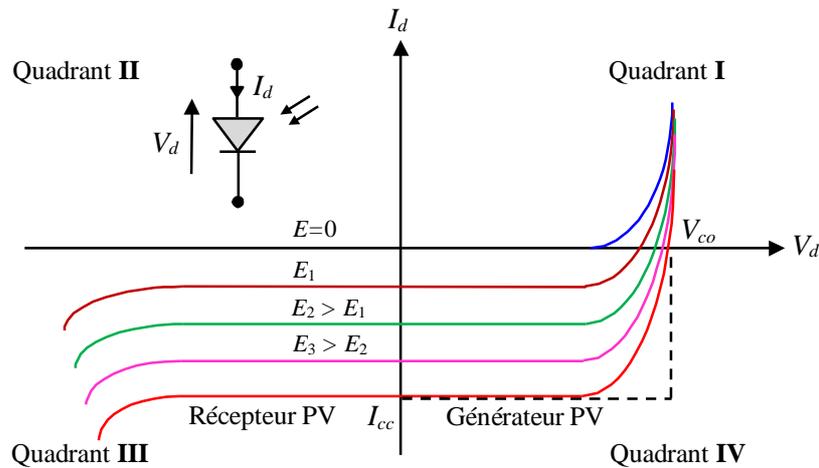


Figure V.10 : Caractéristique d'une jonction PN sous éclairement

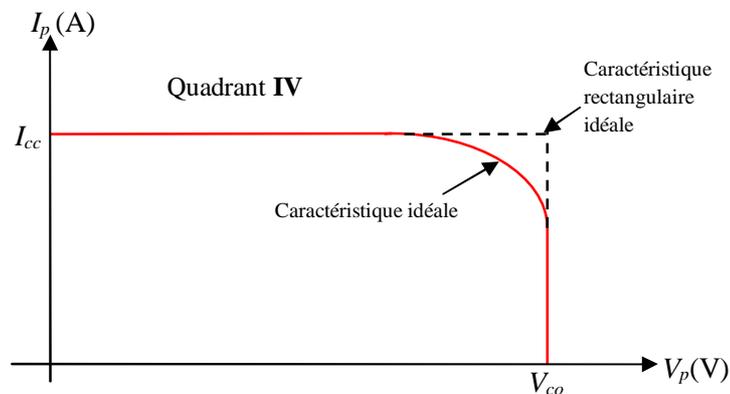


Figure V.11 : Caractéristique  $I_p(V_p)$  d'une cellule photovoltaïque idéale.

Avec respectivement :

$I_p$  et  $I_{cc}$  : courants photovoltaïque et de court-circuit ;

$V_p$  et  $V_{co}$  : tensions photovoltaïque et en circuit ouvert.

### V.5.1.3. Les différentes technologies

Les cellules photovoltaïques sont principalement fabriquées à partir de semi-conducteurs en silicium, à base de silicium monocristallin (c-Si), le silicium polycristallin (pc-Si) (plus de 80% de la production mondiale), de silicium amorphe (a-Si) modules et le

silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium) [104].

Dans les applications terrestres, les modules de type PV pc-Si sont les plus largement appliqués entre photovoltaïque de type silicium, suivis par le tellurure de cadmium (CdTe) et le cuivre indium gallium CIGS de sélénure, tandis que de nouveaux types de systèmes photovoltaïques comme des cellules solaires à colorant, ont été étudiés.

Le silicium dans le photovoltaïque est encore le principal type de cellules utilisé dans les applications, car il a une plus grande durabilité et une plus grande efficacité que les autres photovoltaïques.

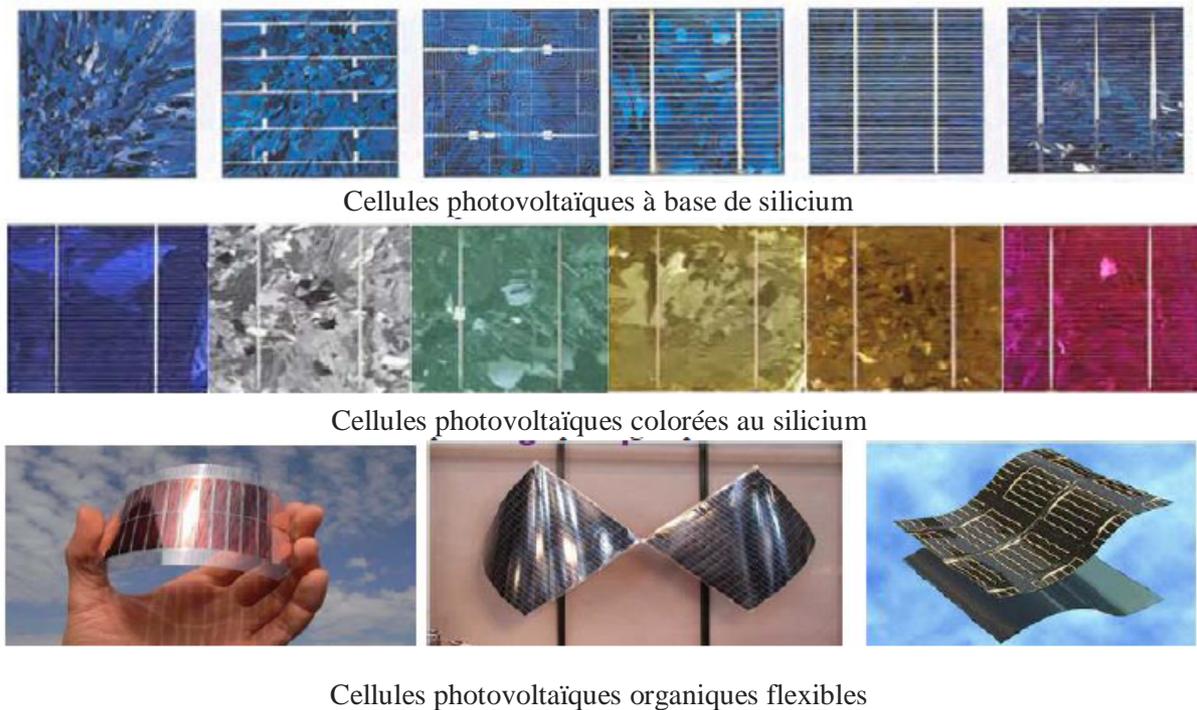


Figure V.12 : Différentes technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque.

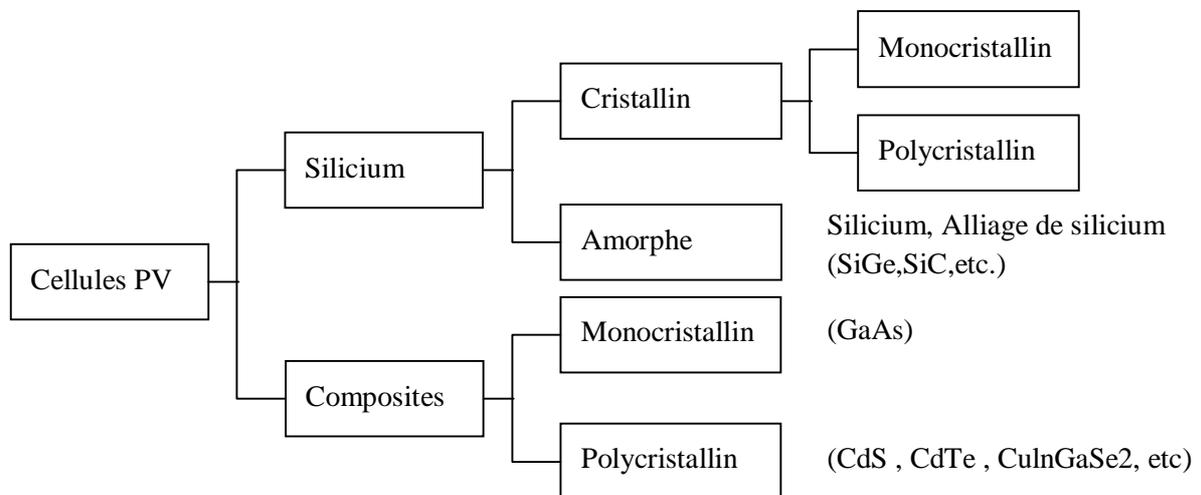


Figure V.13 : Classification des différents semi-conducteurs utilisés dans les cellules PV [104].

#### V.5.1.4. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules et de la matière qui les compose.

Le point de fonctionnement de cet ensemble de panneaux photovoltaïques est défini par l'intersection de sa caractéristique courant-tension avec la ligne de charge [105].

Voici la description des paramètres d'un module [105] :

- **La puissance crête  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- **La caractéristique  $I = f(V)$**  : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum  $(U_m, I_m)$**  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$ .

##### A. Modèle à une seule exponentielle

Ce modèle est connu sous l'appellation à une seule diode, car le schéma électrique équivalent de la cellule solaire comporte une seule diode comme le montre la figure ci-dessous [106].

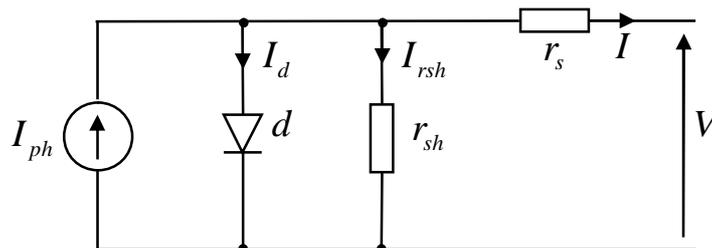


Figure V.14 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire (modèle à une exponentielle).

La caractéristique courant-tension est décrite par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + r_s \cdot I)}{A \cdot T \cdot K} \right) - 1 \right] - \frac{V + r_s \cdot I}{r_{sh}} \quad (V.2)$$

Avec :

$I$  : Courant délivré par la cellule PV ;

$V$  : Tension délivrée par la cellule PV ;

$I_{ph}$  : Courant photo-générateur ;

$I_s$  : Courant de saturation de la diode dépendant de la température ;

$r_s$  : Résistance série, représente les diverses résistances de contacts et de connexions ;

$r_{sh}$  : Résistance shunt, caractérise les divers courants de fuite dus à la diode et aux effets de bords de la jonction ;

$T$  : Température de la cellule (en °K).

### B. Modèle à double exponentielle

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque (modèle à double exponentielle) est représenté sur la figure suivante [106] :

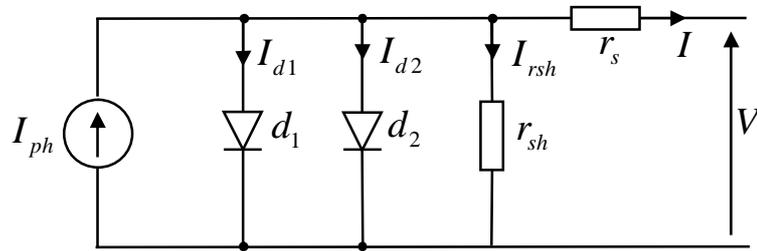


Figure V.15 : Schéma équivalent d'une cellule solaire (modèle à double exponentielle).

Le deuxième terme de l'équation (V.2) n'est rien d'autre que l'expression qui donne le courant de la diode ; il est représenté sous la forme de la superposition linéaire d'un courant de diffusion et d'un courant de génération recombinaison selon l'équation suivante :

$$I_d = I_{s1} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + r_s \cdot I)}{A_1 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] + I_{s2} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + r_s \cdot I)}{A_2 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (V.3)$$

D'où, le modèle à double exponentielle dont la caractéristique courant-tension est décrit par l'expression ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + r_s \cdot I)}{A_1 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + r_s \cdot I)}{A_2 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V + r_s \cdot I}{r_{sh}} \quad (V.4)$$

### C. Modèle d'étude

Pour notre cas, le modèle choisi est celui « à une seule exponentielle », tel que sa caractéristique est décrite par l'expression (V.2) où les paramètres  $I_{ph}$ ,  $I_s$  et  $r_{sh}$  sont fonction de l'éclairement, de la température et de leurs valeurs de référence respectives ( $I_{ph0}$ ,  $I_{s0}$ ,  $r_{sh0}$ ) à  $1 \text{ KW/m}^2$  et  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### ❖ Courant photo-généré

Il s'exprime par la relation suivante [106] :

$$I_{ph} = I_{ph0} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot [1 + (T - T_0) \cdot 5 \cdot 10^{-4}] \quad (\text{V.5})$$

Avec :

$E$  : l'éclairement ( $E_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ ) ;

$T$  : température en  $^\circ\text{K}$  ( $T_0 = 298 \text{ }^\circ\text{K}$ ) ;

$I_{ph0}$  : courant photo-généré par la diode à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### ❖ Courant de saturation de diode

Il est donné par la relation suivante [106] :

$$I_s = I_{s0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (\text{V.6})$$

Avec :

$I_{s0}$  : courant de saturation de la diode à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ;

$E_g$  : Energie de gap du semi-conducteur.

#### ❖ Résistance shunt

Elle est donnée par la relation suivante [106] :

$$r_{sh} = r_{sh0} + (a - 1) \cdot r_{sh0} \cdot \exp\left(-5,5 \cdot \frac{E}{E_0}\right) \quad (\text{V.7})$$

Avec :

$r_{sh0}$  : résistance shunt de référence donnée par le constructeur ;

$\alpha$  : constante liée à la nature du silicium utilisé :

$\alpha = 4$  pour une cellule au silicium cristalline et autre ;

$\alpha = 12$  pour une cellule au silicium amorphe.

### V.5.1.5. Association des cellules photovoltaïques

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules, pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel électrique usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques watts-crête ( $W_c$ ) et quelques dizaines de watts-crête. ( $W_c$  représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard, Irradiation solaires de  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T^\circ$  de jonction de  $25^\circ\text{C}$ , charge optimale) [107] [108].

#### V.5.1.5.1. Association en série

L'assemblage se présente sous la forme suivante :

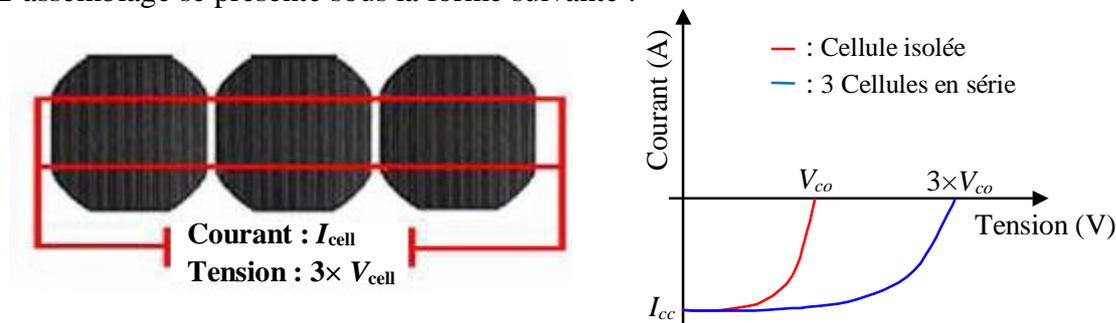


Figure V.16 : Association en série de  $n_s$  cellules PV identiques.

Si on assemble en série  $n_s$  cellules, la tension  $V$  aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules.

La caractéristique courant-tension résultante de cet assemblage est obtenue par l'addition des tensions comme on peut le constater dans la figure suivante :

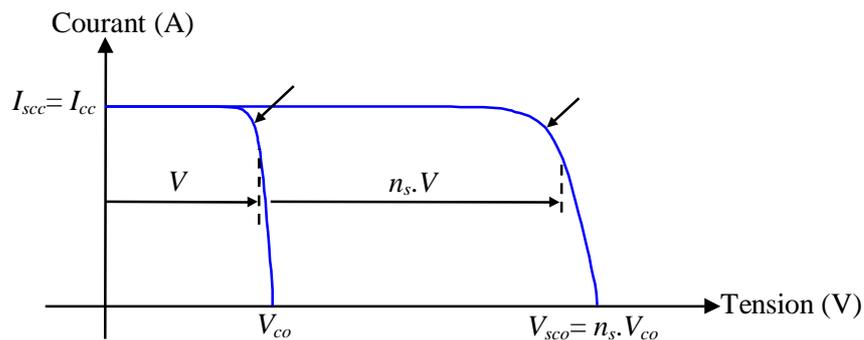


Figure V.17 : Caractéristique  $I(V)$  de l'association de  $n_s$  cellules identiques en série.

#### V.5.1.5.2. Association en parallèle

Dans le cas d'un assemblage en parallèle de  $n_p$  cellules PV, le courant  $I$  de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules. La figure (V.18) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles  $n_p$  cellules identiques [109].

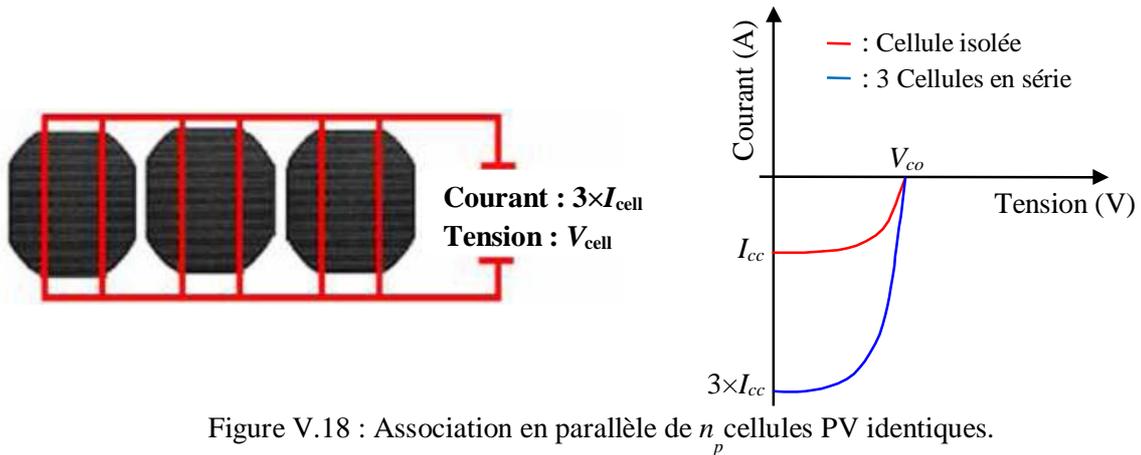


Figure V.18 : Association en parallèle de  $n$  cellules PV identiques.

Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante est obtenue par l'addition des courants comme l'indique la figure (V.19).

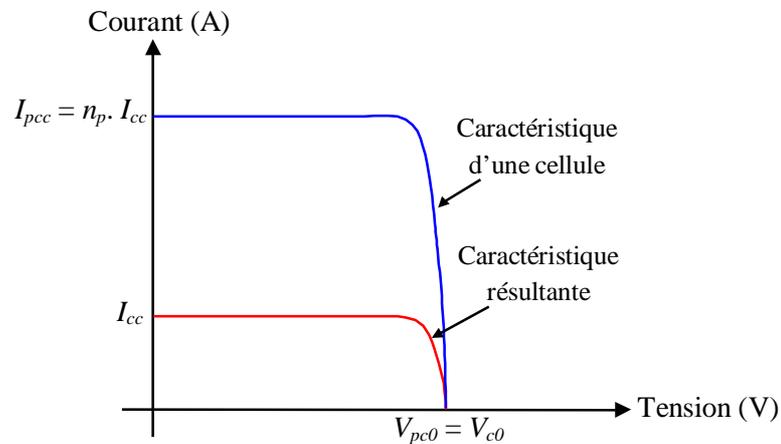


Figure V.19: Caractéristique courant-tension de l'association de  $n_p$  cellules identiques en parallèle. Dans cette figure,  $V_{co}$  et  $V_{pc0}$  représentent respectivement la tension d'une cellule et la tension de tout l'assemblage ;  $I_{cc}$  et  $I_{pcc}$  étant respectivement le courant de court-circuit d'une cellule et le courant de regroupement. Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent donc la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents.

### V.5.1.5.3. Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  sont données par les relations (V.10). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [109]:

$$\begin{aligned} I_{cc}^* &= n_p \cdot I_{cc} \\ V_{co}^* &= n_s \cdot V_{co} \end{aligned} \tag{V.8}$$

Avec:

$n_p$  : Nombre des cellules en parallèle,  $n_s$  : Nombre des cellules en série.

Cependant, si une ou plusieurs cellules sont occultées, les autres deviennent réceptrices car la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert. En revanche, dès que des déséquilibres importants apparaissent, l'action de certaines diodes de protection séries ou parallèle modifie notablement l'allure de la caractéristique électrique du générateur photovoltaïque, laissant apparaître des cassures comme l'indique la figure (V.20).

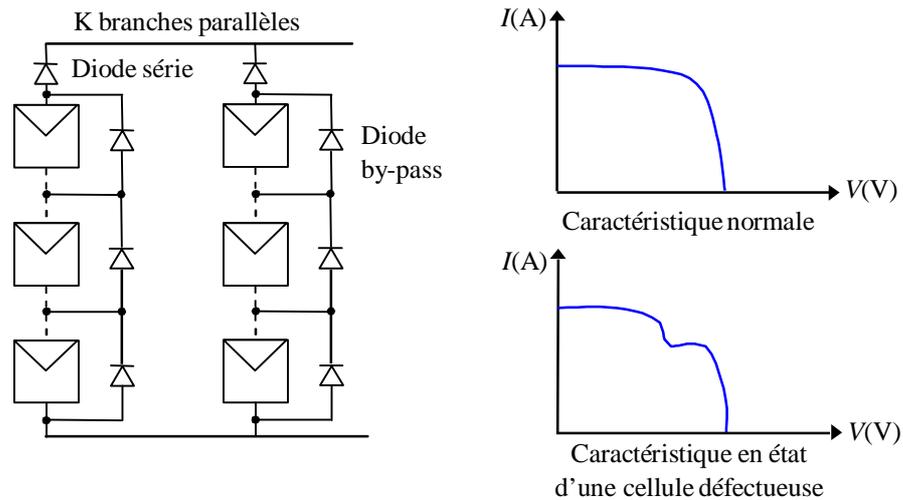


Figure V.20 : Caractéristique courant-tension de l'association de  $n_p$  cellules en parallèle,  $n_s$  cellules en série dont certaines sont occultées.

Donc, en résumé, on peut dire que le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout des diodes de protection, les unes en série pour éviter les courants inverses, les autres en parallèle, dites diodes by-pass, qui n'interviennent qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée [110].

#### V.5.1.6. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)

Les études effectuées ont conduit au développement de nombreux modèles de générateurs, parmi lesquels celui schématisé sur la figure suivante :

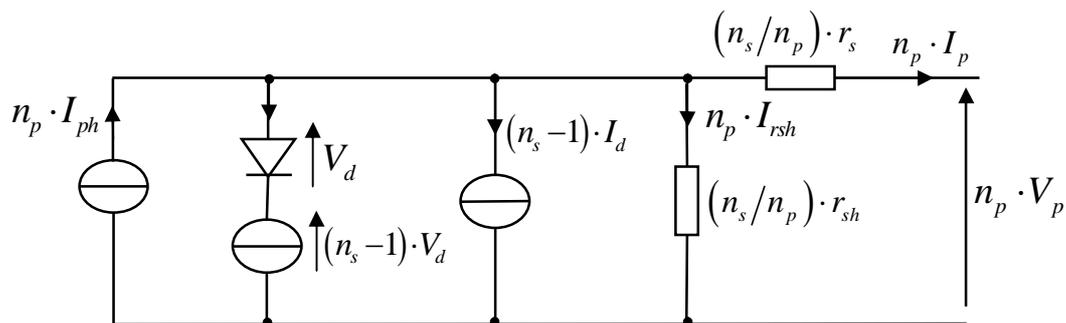


Figure V.21 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque.

L'équation donnant la caractéristique courant-tension  $I(V)$  d'un GPV peut être décrite comme suit :

$$I_g = I_{ph,g} - I_{d,g} - I_{rsh,g} \quad (V.9)$$

Avec :

$$I_g = n_p \cdot I_p \quad (V.10)$$

$$I_{ph,g} = n_p \cdot I_{ph} \quad (V.11)$$

$$I_{d,g} = n_p \cdot I_d \quad (V.12)$$

$$I_{rsh,g} = n_p \cdot I_{rsh} \quad (V.13)$$

$$V_g = n_p \cdot V_p \quad (V.14)$$

$$V_{d,g} = n_s \cdot V_d \quad (V.15)$$

$$r_{s,g} = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s \quad (V.16)$$

$$r_{sh,g} = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_{sh} \quad (V.17)$$

D'où l'expression finale de  $I_g$  :

$$I_g = I_{ph,g} - I_{s,g} \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V_g + r_{s,g} \cdot I_g)}{A \cdot K \cdot n_s \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_g + r_{s,g} \cdot I_g}{r_{sh,g}} \quad (V.18)$$

### V.5.1.7. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque

Afin de valider le modèle mathématique d'un GPV, nous allons choisir un exemple de module qui contient 36 cellules en série. Ce module a été simulé par le logiciel Matlab/Simulink avec ( $T = 25^\circ\text{C}$  et  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ). Les caractéristiques courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  sont montrés dans les figures suivantes.

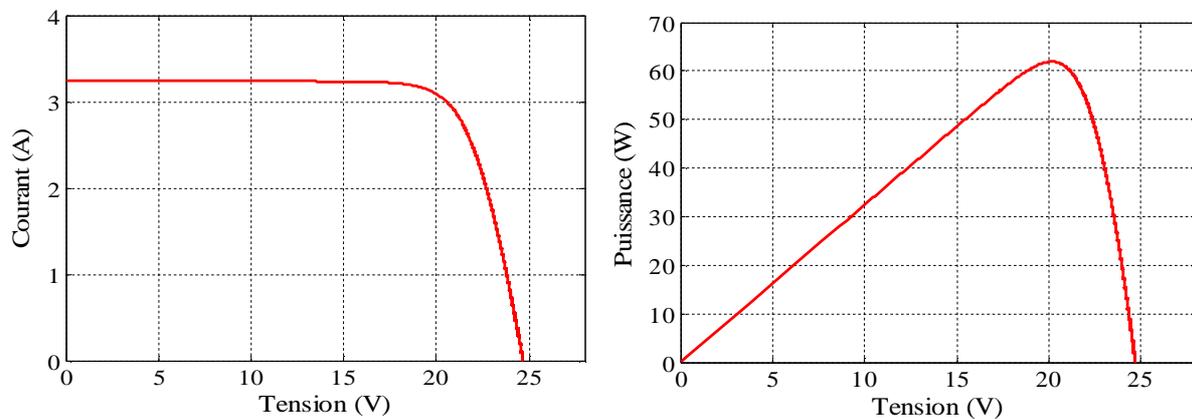


Figure V.22 : Caractéristiques courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  d'un module photovoltaïque.

### V.5.1.8. Caractéristique $I(V)$ d'un panneau photovoltaïque

On a simulé une combinaison de 2 modules photovoltaïques, placés en série et en parallèle ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $E=1000 \text{ W/m}^2$ ).

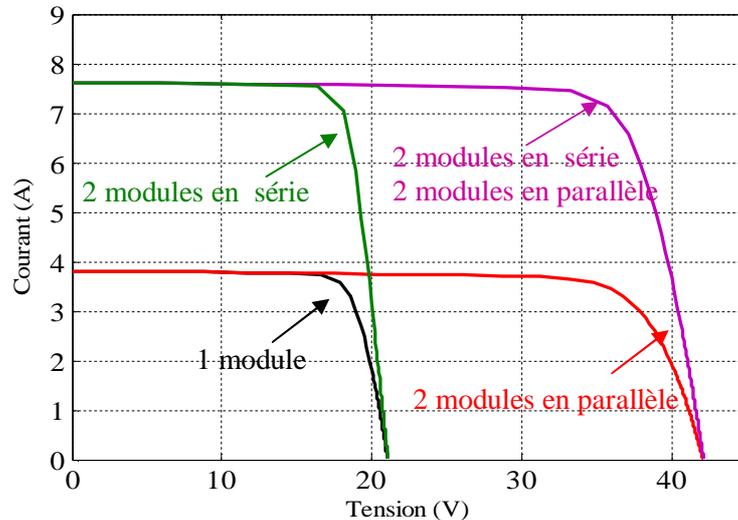


Figure V.23 : Caractéristique courant-tension résultante d'un groupement en série et en parallèle des modules identiques.

### V.5.1.9. Influence des paramètres externes sur la caractéristique $I(V)$

#### V.5.1.9.1. Influence des résistances série et shunt

A partir du circuit équivalent d'une photopile réelle, on constate que d'autant la résistance série est faible et la résistance shunt est grande, on collecte un maximum de courant ce qui implique un maximum de puissance. La figure (V.24) illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances série.

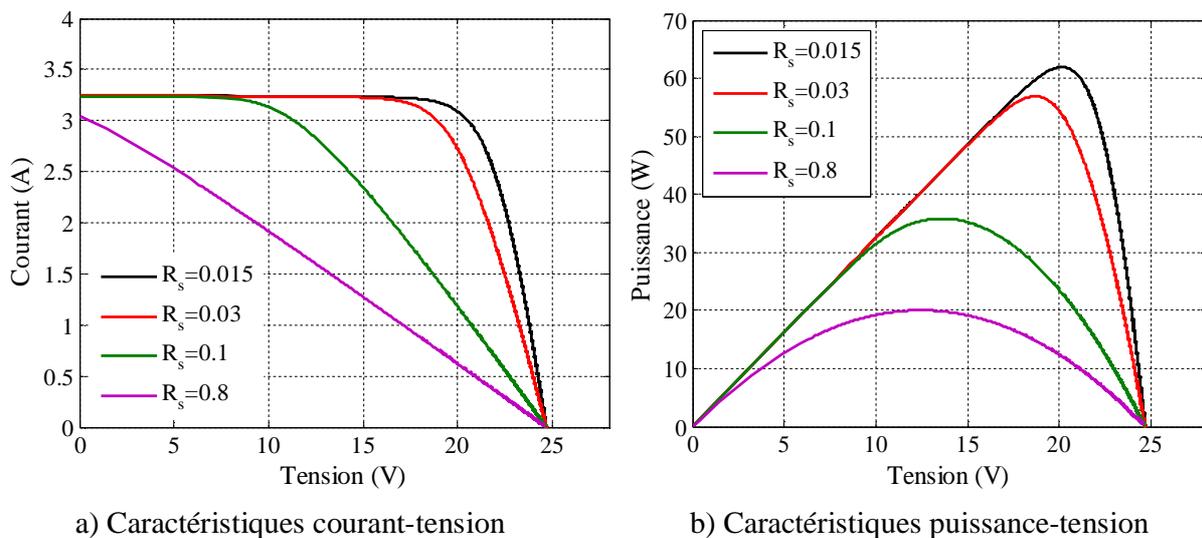


Figure V.24 : Influence de la résistance série sur les caractéristiques PV

La figure (V.25) montre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances shunt. En augmentant  $R_s$  ou en diminuant  $R_p$ , on s'éloigne du rectangle idéal  $V_{CO}, I_{CC}$  de la caractéristique I/V qui correspond au FF=1 et de même la puissance diminue.

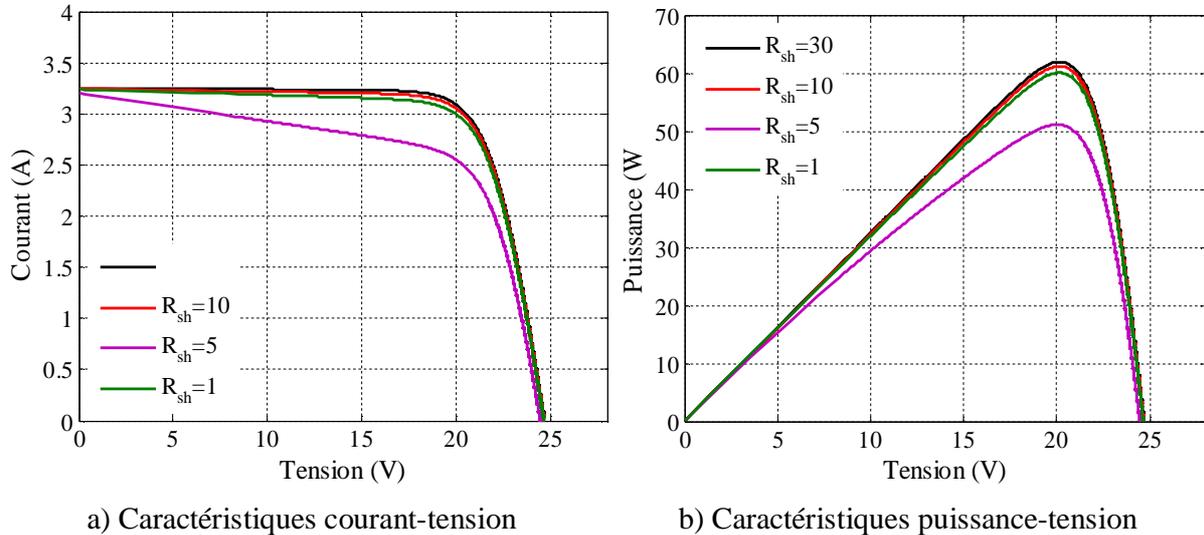


Figure V.25 : Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques PV

#### V.5.1.9.2. Influence de l'éclairement

Les figures (V26), montrent respectivement la caractéristique I-V et P-V d'un module PV en fonction de l'éclairement incident et à température ambiante. Nous constatons que les variations de courant de court-circuit (c'est à dire pratiquement le photo-courant crée dans le module PV est proportionnel au flux solaire incident). D'où le forte influence de l'éclairement sur le courant débité par le module PV. Cette influence se traduit par une augmentation de la puissance disponible dans les modules PV chaque fois l'éclairement augmente et à chacune des valeurs du flux lumineux correspond à une puissance électrique maximale que pourrait fournir un module PV.

$$I_{cc} = I_{cc}^* \left( \frac{G}{G^*} \right) + a_1 (T - T^*) \quad (V.19)$$

$I_{cc}^*$  : Représente le courant de court-circuit.

$a_1$  : ( $A/^\circ C$ ) Coefficient obtenu empiriquement.

$G^*$  : Irradiation de référence vaut  $1kW/m^2$   $1kW/m$ .

$T^*$  : Température ambiante égale à  $25^\circ C$  .

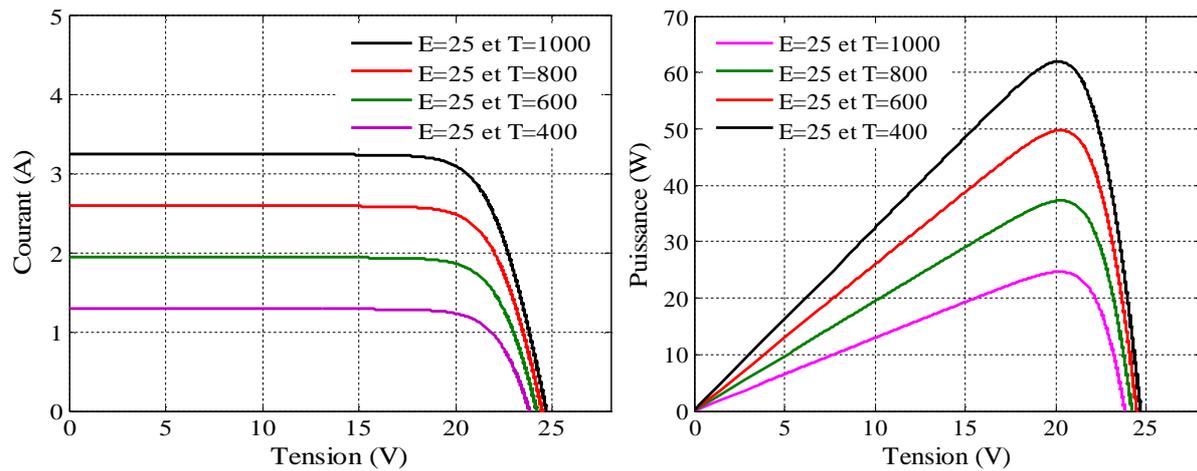


Figure V.26 : Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un module PV pour différentes valeurs d'éclairement et une température constante.

### V.5.1.9.3. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement d'un module PV. Nous constatons à la figure (V.27), qui représente la caractéristique  $I(V)$  pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de la température, que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie peu en fonction de température. Par contre, l'augmentation de la température engendre une diminution de la tension en circuit ouvert et se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible dans les modules PV. D'où l'influence de la température sur le comportement du module PV. La tension à vide d'un module PV en fonction de la température et de l'éclairement est donnée par la relation suivante:

$$V_{C0} = V_{C0}^* + a_2(T - T^*) - (I_{CC} - I_{CC}^*) \cdot R_s \quad (V.20)$$

$V_{C0}^*$  et  $I_{CC}^*$  : représentent respectivement la tension de court-circuit et le courant de court circuit à  $T = 25^0 C$  et  $G = 1kw/m^2$

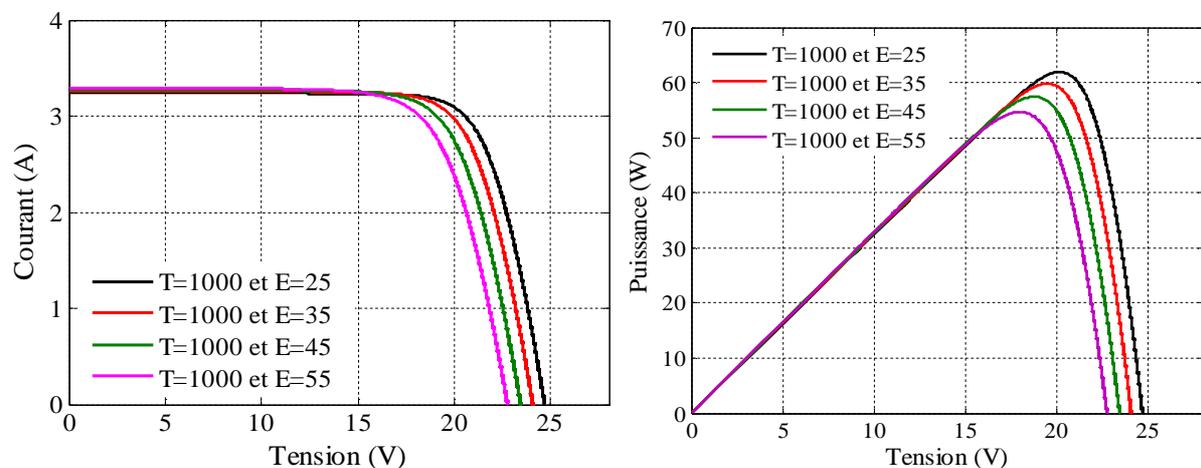


Figure V.27 : Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module PV pour différentes valeurs de température et un éclairement constant.

### V.5.1.10. Fonctionnement optimal du GPV

La figure (V.28) représente la caractéristique  $I(V)$  d'un GPV pour un éclairement et une température donnés. On place une charge résistive variable aux bornes du générateur photovoltaïque. La puissance délivrée à cette charge dépendra seulement de la valeur de sa résistance  $r$ . Le point de fonctionnement optimal (MPP) de coordonnées  $(V_{opt}, I_{opt})$  du GPV est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique  $I(V)$  avec celle de la droite de charge de pente  $(1/r)$ .

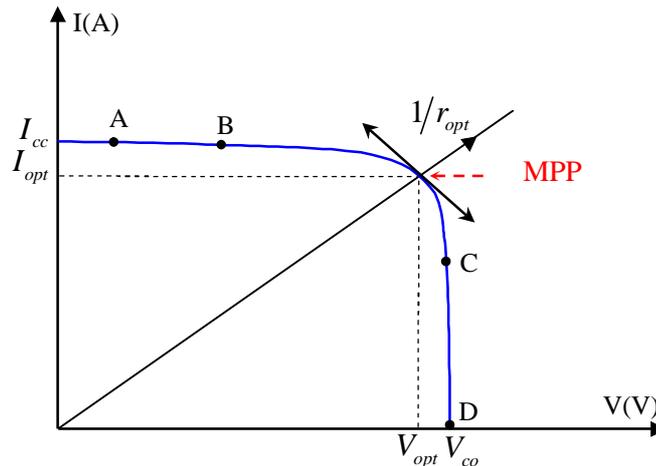


Figure V.28 : Caractéristique  $I(V)$  pour une charge résistive variable.

Seule pour une charge dont la caractéristique passe par le point MPP  $(V_{opt}, I_{opt})$  permet d'extraire la puissance optimale, qu'on appelle résistance optimale  $(r_{opt})$ . Sa valeur est donnée par la relation :

$$r_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} \quad (V.21)$$

Si  $r$  est de valeur faible, le GPV travaillera dans la zone (A à B), dans laquelle il se comporte comme une source de courant constant, de valeur égale au courant de court-circuit [111]. Par contre, si  $r$  est élevée, le GPV travaillera dans la zone (C à D), où il se comporte comme un générateur de tension ; sa valeur est presque égale à celle de la tension de circuit ouvert.

Pour assurer le fonctionnement optimal du GPV, un équipement de commande doit être mis entre le GPV et la charge, dont le but est l'adaptation des deux équipements (générateur photovoltaïque - charge) pour un meilleur transfert d'énergie vers la charge. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance de GPV, nous utilisons pour cela un convertisseur DC-DC (hacheur) muni d'une commande MPPT, ce qu'on appelle poursuite de point de puissance maximale.

### V.5.1.11. Recherche de point de puissance maximale MPPT

Pour convertir l'énergie solaire avec un meilleur rendement, il est indispensable de travailler avec un point de fonctionnement à puissance maximale. On utilise un étage d'adaptation appelé : convertisseur MPPT. La Figure (V.29) présente une connexion GPV-charge via un étage d'adaptation. Ce dernier consiste en un convertisseur DC/DC si la charge est de type continu ou d'un convertisseur à deux étages DC/DC suivi par un autre DC/AC si la charge est de type alternatif. Différents types de convertisseurs DC/DC peuvent être utilisés, soit sans isolation galvanique comme Buck (dévolteur), Boost (survolteur), Buck-Boost (dévolteur - survolteur), Cuck ou Sepic ; soit avec isolation galvanique comme Flyback ou Forward. Le convertisseur DC/AC peut être monophasé ou triphasé. Cet étage d'adaptation doit être muni d'une commande MPPT analogique ou numérique.

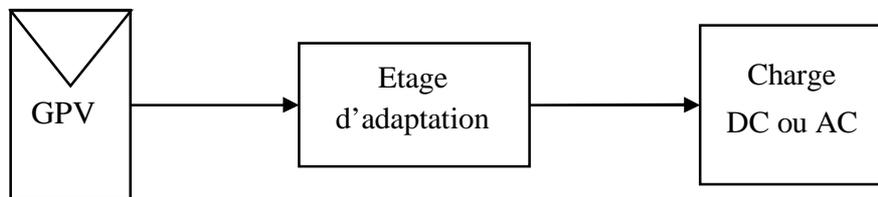


Figure V.29 : Connexion GPV-charge à travers un étage d'adaptation.

Dans le but de ne pas compliquer les choses lors de la réalisation des travaux de cette thèse qui a pour objectif l'optimisation énergétique d'une chaîne de conversion PV, une configuration très simple a été choisie pour l'étude. Elle consiste en un GPV débitant sur une résistance par l'intermédiaire d'un convertisseur comme illustré sur la figure (V.30).

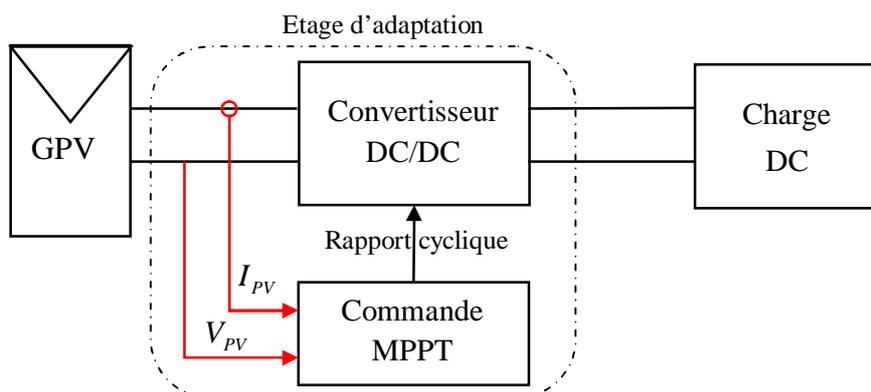


Figure V.30 : Connexion GPV-charge à travers un convertisseur DC/DC.

### V.5.1.12. Rendement de la chaîne de puissance

Pour une chaîne de conversion solaire qui consiste en une interface d'électronique de puissance entre une source et une charge, comme celle illustrée à la figure (V.30), on définit un rendement énergétique total  $\eta_{total}$ . Ce rendement est le rapport entre la puissance

transmise à la charge  $P_{charge}$  et la puissance reçue par la surface active du panneau  $G \cdot A_{eff}$ . Aussi, il peut être décrit par le produit de rendement des trois parties qui compose le système [112].

$$\eta_{total} = \eta_{PV} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{Conv} \quad (V.22)$$

Avec  $\eta_{PV}$  le rendement de la conversion photons-électrons du panneau solaire est donné par :

$$\eta_{PV} = \frac{P_{max}}{G \cdot A_{eff}} \quad (V.23)$$

Où  $A_{eff}$  est la surface de la partie active effectuant réellement la conversion PV,

$P_{max}$  est la puissance maximale disponible à la sortie du panneau, elle dépend des paramètres physiques du panneau et des conditions météorologiques;

$\eta_{MPPT}$  est le rendement MPPT, appelé aussi rendement de la commande. Il permet de mesurer l'efficacité de la commande.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_e}{P_{max}} \quad (V.24)$$

Où  $P_e$  est la puissance effectivement délivrée par le panneau et se trouve à l'entrée du convertisseur  $\eta_{Conv}$  et est le rendement du convertisseur, généralement fourni par les documents constructeurs, et est défini par :

$$\eta_{Conv} = \frac{P_{charge}}{P_e} \quad (V.25)$$

Donc le rendement global de la chaîne peut s'exprimer par :

$$\eta_{total} = \frac{P_{max}}{G \cdot A_{eff}} \cdot \frac{P_e}{P_{max}} \cdot \frac{P_{charge}}{P_e} = \frac{P_{charge}}{G \cdot A_{eff}} \quad (V.26)$$

#### V.5.1.13. Convertisseur survolteur (Boost converter)

Un convertisseur Boost, (ou parallèle) est connu par le nom d'élévateur de tension. Ce convertisseur est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP.

La figure (V.31) représente le convertisseur boost. La tension d'entrée DC est en série avec une inductance L qui agit comme une source de courant. Un interrupteur T est en parallèle avec la source de courant qui s'ouvre et se ferme périodiquement, fournissant l'énergie de l'inductance et de la source pour augmenter la tension de sortie moyenne.

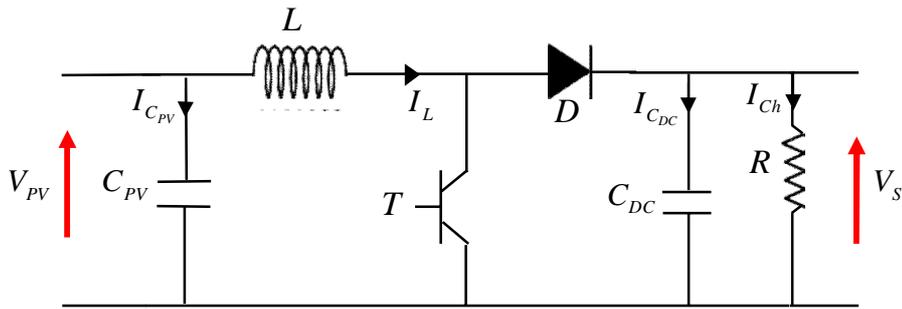


Figure V.31 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.

### V.5.1.13.1. Modèle mathématique équivalent

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (S1 ferme, et S1 ouvert), puis faire un modèle approxime (Averaged Model), qui englobe les différentes grandeurs moyennes d'entrées et de sorties du convertisseur.

#### a) Pour la première période DTs

Sur la figure (V.32), l'interrupteur T1 est fermé et D1 est ouvert, le circuit est divisé en deux parties différentes: source charge l'inductance à gauche tandis que à la droite le condensateur qui sert à maintenir la tension de sortie via l'énergie stockée précédemment. Le courant de l'inductance L est augmenté progressivement.

$$\begin{cases} I_{C_{PV}} = C_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \\ I_{C_{DC}} = C_{DC} \frac{dV_{Ch}}{dt} = -I_{Ch} \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L \cdot I_L \end{cases} \quad (V.27)$$

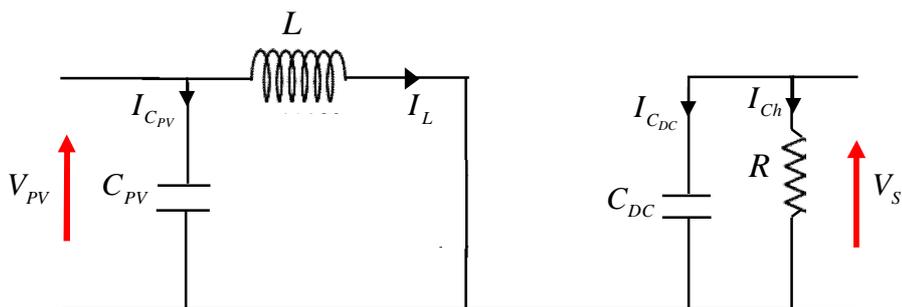


Figure V.32 : Diagramme lors de l'interrupteur T1 fermé et D1 ouvert.

#### b) Pour la deuxième période (1-D)Ts

Sur la figure (V.33), le commutateur T1 est ouvert et D1 est fermé, l'énergie au long de la source DC qui est stockée dans l'inductance contribue à compléter la puissance du circuit qui se trouve à droite, ce qui entraînera une augmentation de la tension de sortie. Ensuite, le

courant d'inductance se décharge et diminue progressivement. La tension de sortie pourrait être maintenue à un niveau souhaité particulier si la séquence de commutation est contrôlée. Le hacheur Boost peut être modélisé en utilisant les équations différentielles ordinaires suivantes :

$$\begin{cases} I_{C_{PV}} = C_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \\ I_{C_{DC}} = C_{DC} \frac{dV_{Ch}}{dt} = I_L - I_{Ch} \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_{Ch} - R_L \cdot I_L \end{cases} \quad (V.28)$$

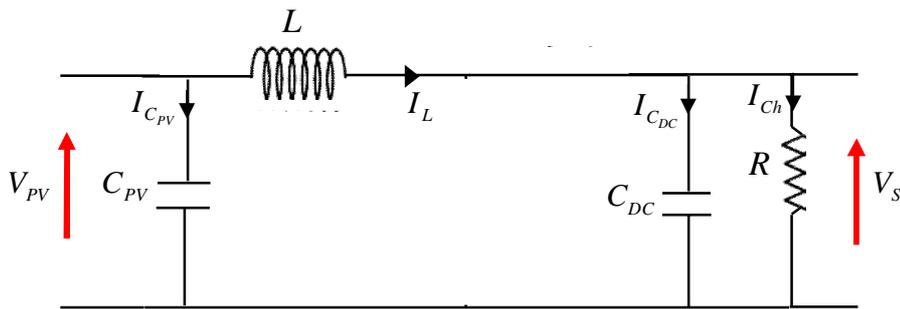


Figure V.33 : Diagramme lorsque l'interrupteur T1 est éteint et D1 est allumé.

#### V.5.1.13.2. Le rapport de conversion

Le rapport cyclique (D) du régulateur MPPT contrôle le commutateur du convertisseur élévateur T1 via un signal de commande par modulation de largeur d'impulsion.

Le rapport de tension pour un convertisseur élévateur est dérivé sur la base de l'intégrale de temps de la tension d'inductance égale à zéro sur la période de commutation. Le rapport de tension est équivalent au rapport de la période de commutation sur le temps d'arrêt de l'interrupteur [113].

Le condensateur Cdc est suffisamment grand pour maintenir la tension de sortie constante et l'inductance fournit l'énergie qui permet de augmenter la tension aux bornes de la charge, lorsque l'interrupteur est ouvert.

Lorsque le commutateur T1 est fermé,  $V_L = V_L$  peut être exprimé comme décrit dans [113]:

$$\begin{cases} V_L = V_e = V_{PV} \\ I_{C_{DC}} = \frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (V.29)$$

Quant T1 est ouvert, et D1 est fermé on obtient :

$$\begin{cases} V_L = V_e - V_s \\ I_{C_{DC}} = I_L - \frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (V.30)$$

En supposant l'approximation d'une petite d'ondulation  $v_0 \approx V_0$  et  $i_L \approx I$

Dans un état stabilisé, l'intégrale de temps de la tension au cours d'un temps propre doit être nulle

$$\int_0^{T_s} V_L(t) dt = (V_e)DT_s + (V_e - V_0)DT_s \quad (V.31)$$

Après avoir mise l'équation (V.17) à zéro, la tension et le courant de sortie sera:

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_e}{1-D} \\ I_s = \frac{(1-D)}{I_e} \end{cases} \quad (V.32)$$

On peut voir que la tension de sortie augmente à mesure que D augmente. Le convertisseur élévateur boost idéal est capable de produire toute tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

La figure (V.34) résume les formes d'onde des courants et les tensions de sortie en termes de convertisseur boost. Le commutateur se ferme et s'ouvre pendant une période de  $T_{on}$  et  $T_{off}$ . Lorsque l'interrupteur est fermé, la tension aux bornes de l'interrupteur est nulle et une fois que l'interrupteur est ouvert, la tension est égale  $V_s$ . La tension aux bornes de l'inductance  $L$  est égale à la tension photovoltaïque pendant le temps de fonctionnement du transistor.

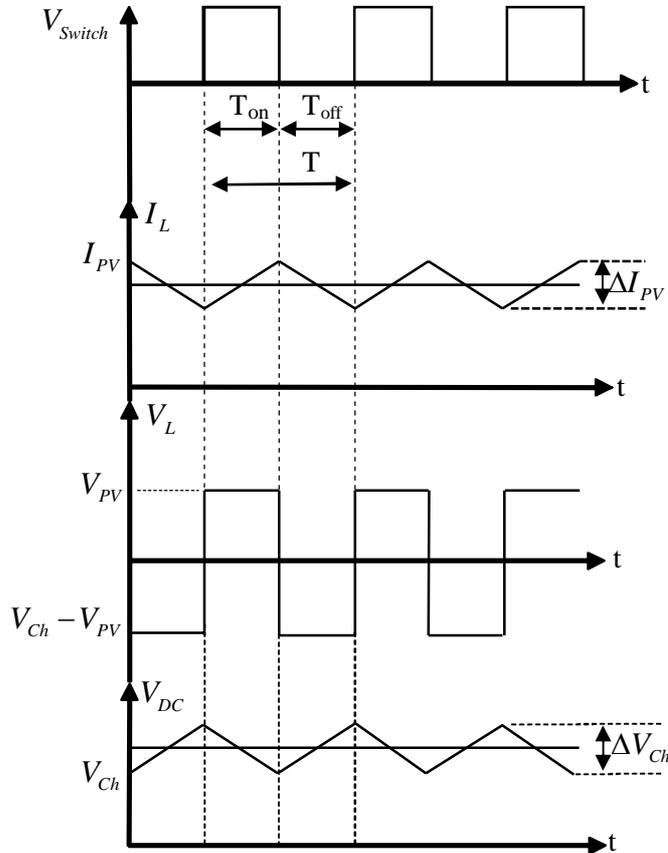


Figure V.34 : Formes typiques d'onde du convertisseur boost.

### A. Sélection de l'inductance

Les valeurs de l'inductance d'entrée peuvent être calculées sur la base de l'énergie déchargée pendant les temps de  $T_{on}$  et  $T_{off}$  et des ondulations de courant. Dans le système photovoltaïque, le convertisseur boost fonctionne dans les modes de conduction discontinue et continue. Le mode de conduction du convertisseur peut changer en fonction des conditions atmosphériques. L'inductance est ensuite calculée sur la base du courant d'inductance maximal et à la puissance d'entrée maximale. Dans [113] et [114], l'inductance du convertisseur boost est donnée par

$$L \geq \frac{V_{om} \cdot D_m \cdot (1 - D_m)}{f_s |\Delta I_{L\_ondul}|} \quad (V.33)$$

Où

$D_m$  : Rapport cyclique du commutateur de la puissance d'entrée maximale du convertisseur

$f_s$  : Fréquence de commutation

$V_{om}$  : La composante continue maximum de la tension de sortie

$\Delta I_{L\_ondul}$  : Erreur de l'ondulation du courant de l'inductance

### B. Condensateur de découplage de puissance

Le condensateur de découplage de puissance  $C_{PV}$  est le condensateur relié en parallèle avec le générateur photovoltaïque. Il s'agit du condensateur à l'entrée du convertisseur boost. Le condensateur de découplage est calculé dans [114] avec :

$$C_{PV} = \frac{I_{om} \cdot D_m^2}{0.02(1 - D_m) f_s \cdot V_{PV\_mpp}} \quad (V.34)$$

Où

$I_{om}$  : Courant de sortie correspond à la puissance de sortie maximale

$V_{PV\_mpp}$  : Tension de sortie PV au point de puissance maximum

Le condensateur en parallèle avec la charge  $C_{DC}$  est le condensateur du circuit intermédiaire.

La valeur du condensateur dépend de la tension d'ondulation minimale. Il est donné dans [115] avec:

$$C_{DC} \geq \frac{V_{Ch} \cdot D}{f_s \Delta V_{Ch} R_{Ch}} \quad (V.35)$$

Où

$V_{Ch}$  : Tension de sortie du convertisseur boost

$\Delta V_{Ch}$  : Tension d'ondulation de sortie

#### V.5.1.14. Stratégie de recherche du point de fonctionnement optimal

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [116] [117]. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $d$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite l'algorithme de commande la plus populaire.

##### V.5.1.14.1. Classique avec un pas de perturbation fixe (PPF)

C'est une méthode largement utilisée [118] – [119], elle a une structure simple, facile à implémenter et donne des résultats intéressants. Son principe est basé sur la perturbation du point de fonctionnement (en augmentant ou diminuant la tension de fonctionnement) et l'observation de son effet sur la puissance ( $P$ ). Si la puissance augmente ( $\Delta P(k) > 0$ ), on est donc dans le bon sens, on continue la perturbation dans le même sens sinon ( $\Delta P(k) < 0$ ), donc on s'éloigne du PPM, on inverse la perturbation. La Figure (V.35) illustre son principe de fonctionnement.

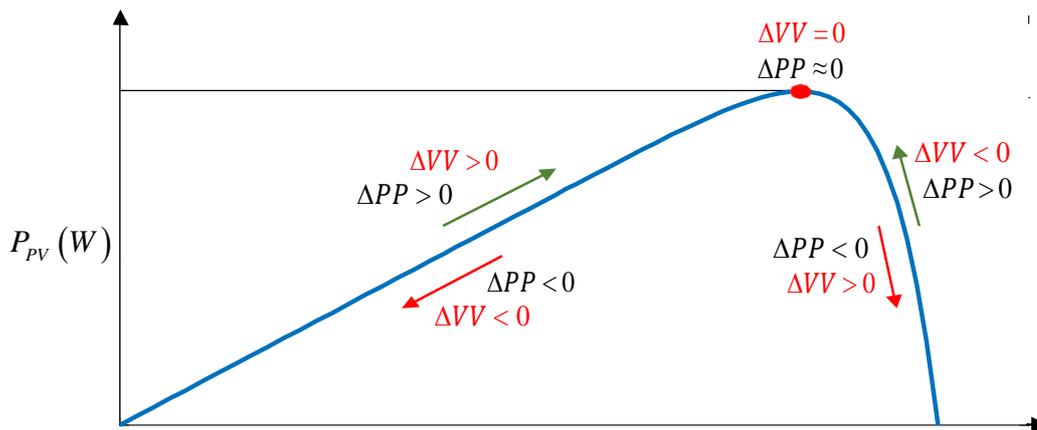


Figure V.35 : Principe de la MPPT avec la méthode PO.

L'organigramme de cette méthode est donné par la Figure (V.36). On récupère le courant et la tension PV puis on calcule la nouvelle puissance ( $t$ ) et la variation de la tension ( $\Delta V$ ), si la puissance a augmenté ( $\Delta P > 0$ ) on est donc dans le bon sens, on continue ainsi d'augmenter  $V$  (si  $\Delta V > 0$ ) ou on continue de la diminuer (si  $\Delta V < 0$ ), sinon ( $\Delta P < 0$ ) il faut inverser (augmenter  $V$  si  $\Delta V < 0$  et diminuer si  $\Delta V > 0$ ).

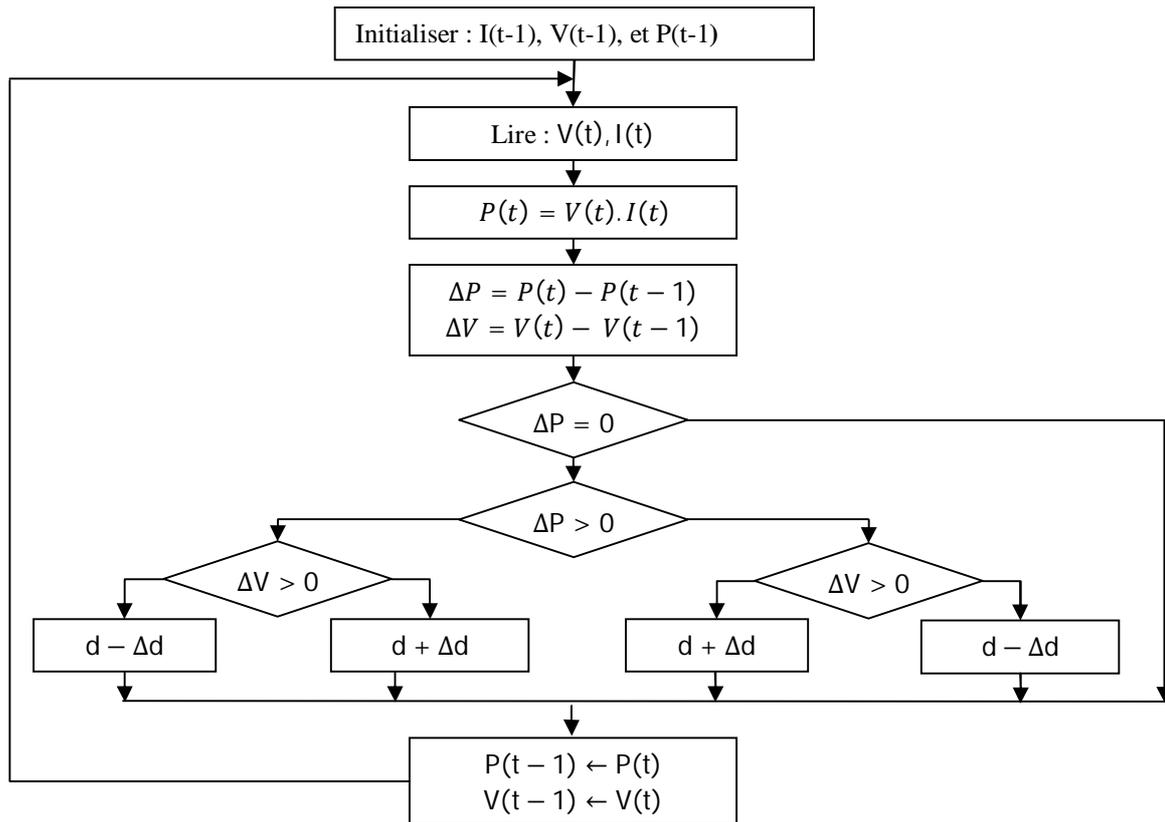


Figure V. 36 : L'algorithme de la méthode perturbation et observation P&O.

### A. Les caractéristiques I-V et P-V

Dans le présent travail, le modèle photovoltaïque utilisé est le SPR-305E-WHT-D. Il a une puissance maximale de 305 W. La fiche technique du PV est donné dans Le tableau (V.2) donne les caractéristiques du module SPR-305E-WHT-D à STC ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T = 25\text{C}^\circ$ ).

Paramètre	Symbole	Valeur
Courant court –circuit	$I_{cc}$	5.96 A
Courant optimale	$I_{opt}$	5.58 A
Tension optimale	$V_{opt}$	54.7 V
Tension circuit ouvert	$V_{oc}$	64.2 V
Nombre de cellules en série	$N_{cell}$	96

Tableau V.2: Valeurs de la fiche technique du module PV SPR-305E-WHT-D à STC.

Pour le but de valider le modèle mathématique d'un GPV (le SPR-305E-WHT-D), nous allons simuler ce module par le logiciel Matlab/Simulink dans les conditions climatique ( $T = 25\text{C}^\circ$  et  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ).

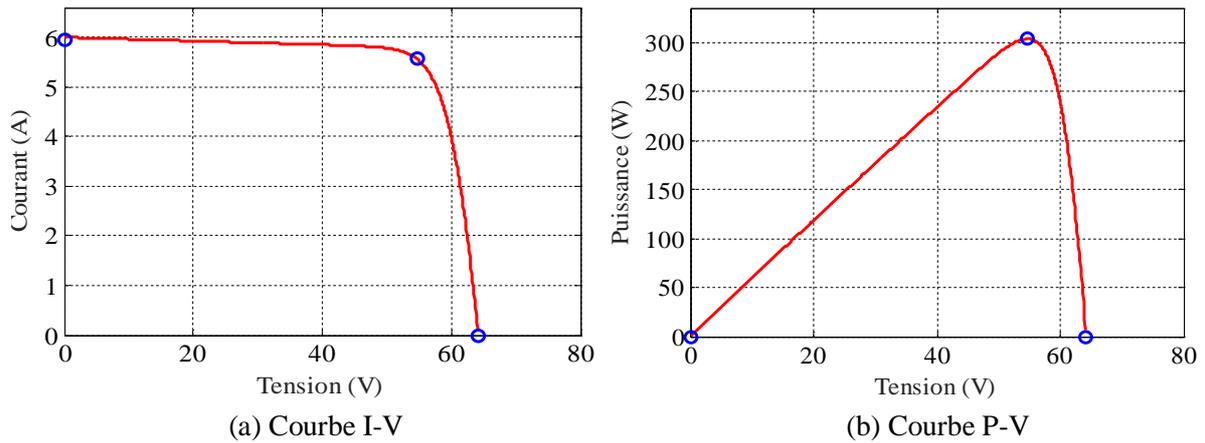


Figure V.37 : Caractéristique I-V et P-V du module photovoltaïque.

La figure (V.37-a) présente les caractéristiques courant-tension du module PV SPR-305E-WHT-D. On peut noter que la sortie de courant maximale est de 5,58 A et la tension maximale de 54,7 V. Ils sont les mêmes que les valeurs données par le fabricant dans le tableau (V.2).

La figure (V.37-b) représente la courbe puissance-tension du module type SPR-305E-WHT-D. Où, on peut noter que la puissance maximale du module est de 305 W.

Le module SPR-305E-WHT-D est connecté en série et en parallèle pour atteindre une puissance de sortie maximale de 7.5 KW et une tension de sortie de 273.5 V. Le tableau (V.3) donne la caractéristique de la PV pour une puissance maximale de 7.5 KW.

Nombre du module en série Nss	5
Nombre du module en parallèle Npp	5
Tension de sortie nominale	273.5 V
Courant de sortie nominale	27.9
La puissance de sortie maximale	7500 W

Tableau V.3: Caractéristiques du photovoltaïque de 7.5 KW.

Les spécifications de la résistance  $R_s$  et  $R_{sh}$  du champ photovoltaïque sont données dans le tableau (V.4), qui a été obtenu à partir de la simulation du champ photovoltaïque.

Paramètres	1 module	7.5 KW GPV
Courant photo-généré $I_{ph}$	6.0092 A	30.046 A
Courant de saturation des diodes $I_0$	$6.3014 \times 10^{-12}$ A	$6.3014 \times 10^{-12}$ A
Facteur d'idéalité de la diode A	0.94504	0.94504
Résistance série $R_s$	$0.37152 \Omega$	$0.37152 \Omega$
Résistance shunt $R_{sh}$	$269.5934 \Omega$	$269.5934 \Omega$

Tableau V.4: Valeurs des paramètres du module photovoltaïque 7.5 KW.

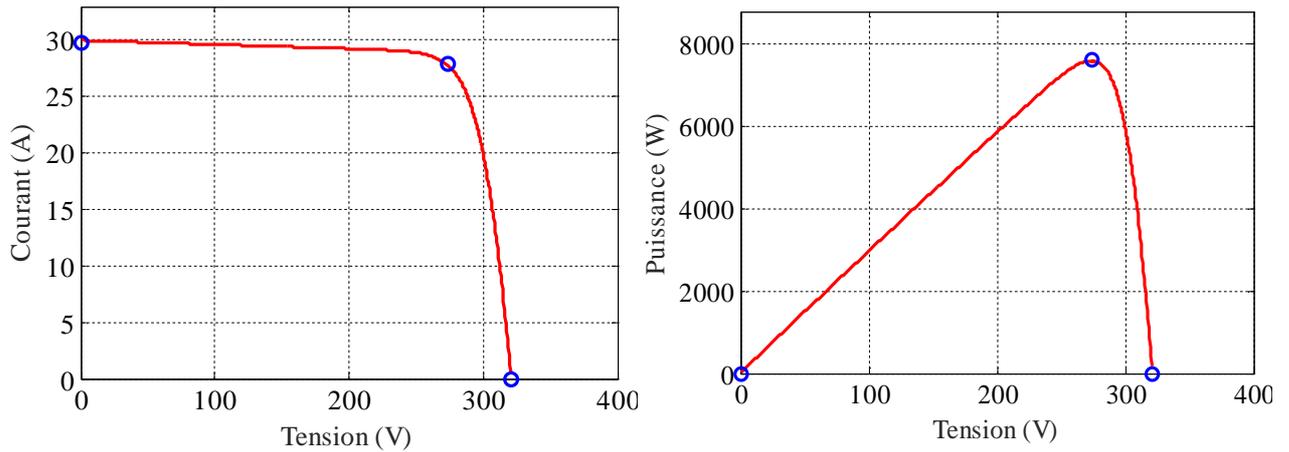


Figure V.38 : Figure V.15 Caractéristique I-V et P-V du module photovoltaïque 7.5KW.

La figure (V.38) sont les caractéristiques du générateur photovoltaïque 7500 W. Le courant et la tension à puissance maximale sont respectivement de 27.9 A et 273.5 V. La puissance maximale avec le générateur photovoltaïque 7.5 kW est 24 fois supérieure à celle du module PV SPR-305E-WHT-D.

**B. Système photovoltaïque avec convertisseur Boost et contrôleur MPPT**

Pour poursuivre le point de puissance maximum lors d'une variation de l'éclairement on adopte l'algorithme perturbation et observation. Le dispositif MPPT est réalisé avec un hacheur survolteur et le GPV est un module PV de 7.5 Kw de puissance qui contient 5 cellules en série et 5 cellules en parallèle, le schéma de principe est donné par la figure (V.30).

La simulation présente une analyse du réseau photovoltaïque 7500W avec le convertisseur élévateur pour suivre le point de puissance maximale.

Les paramètres du convertisseur boost sont calculés à partir de [113] et les valeurs d'inductance et de capacité sont données dans le tableau (V.5). La tension d'entrée nominale du boost est de 273.5 V et la tension de sortie est de 400 V.

Paramètre	Symbole	Valeur
Tension d'entrée	$V_e$	273.5 V
Tension de sortie	$V_s$	400
Capacité d'entrée	$C_{PV}$	50.04 $\mu$ F
Inductance	$L_{Boost}$	1572 $\mu$ F
Capacité de sortie	$L_{DC}$	12.65 $\mu$ F
Résistance de la charge	$R_{Ch}$	21.34 $\Omega$
Fréquence de commutation	$F_{rc}$	10 kHz

Tableau V.5: Paramètres du le hacheur boost.

Afin de valider le fonctionnement du MPPT sur le GPV, La simulation est exécutée à  $t = 0$  s à 1.5s. On procède par l'introduction des variations de grandeur intervenant sur le fonctionnement de MPPT. Pour cela, nous avons introduit un changement progressif d'irradiation entre deux instants à  $t_1 = 0$  s,  $G = 1000$  [ $W / m^2$ ] et à  $t_2 = 0.5$  s,  $G = 400$  [ $W / m^2$ ].

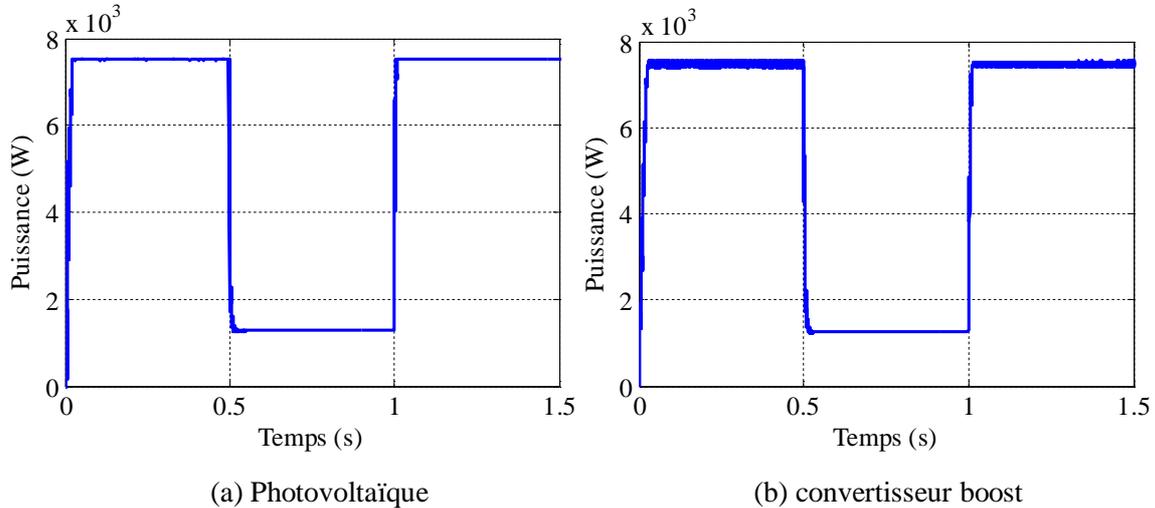


Figure V.39 : Puissance de la sortie photovoltaïque et de la sortie du convertisseur Boost pour  $G$  variable. La figure (V.39-a) représentait la puissance de sortie du générateur photovoltaïque et la figure (V.39-b) représente la puissance après la sortie du convertisseur boost. On remarque que les deux puissances varient de 7500 W à 1270 W. Le générateur PV fonctionne à la puissance maximale en cas de variation de l'irradiation.

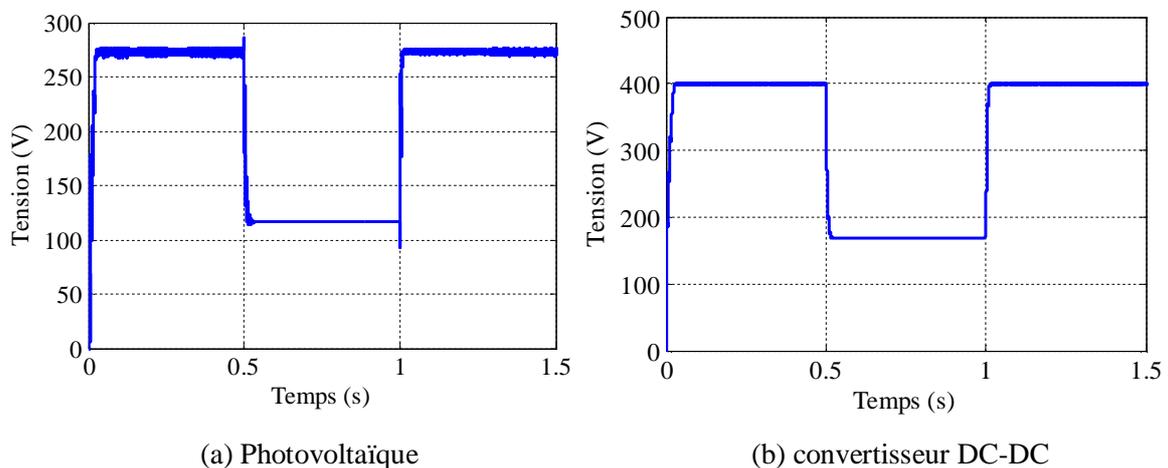


Figure V.40 : Tension de la sortie photovoltaïque et de la sortie du convertisseur DC-DC pour  $G$  variable.

La figure (V.40-a) et (V.40-b) sont les tensions de sortie du PV et de la sortie du convertisseur DC-DC avec le changement d'échelon de l'irradiation. La tension de sortie du PV oscille autour de la puissance maximale avec l'algorithme de perturbation et d'observation. Le convertisseur boost augmente la tension d'entrée de 273.5 V à 400 V puis chute à 170 V lorsque l'irradiation varie.

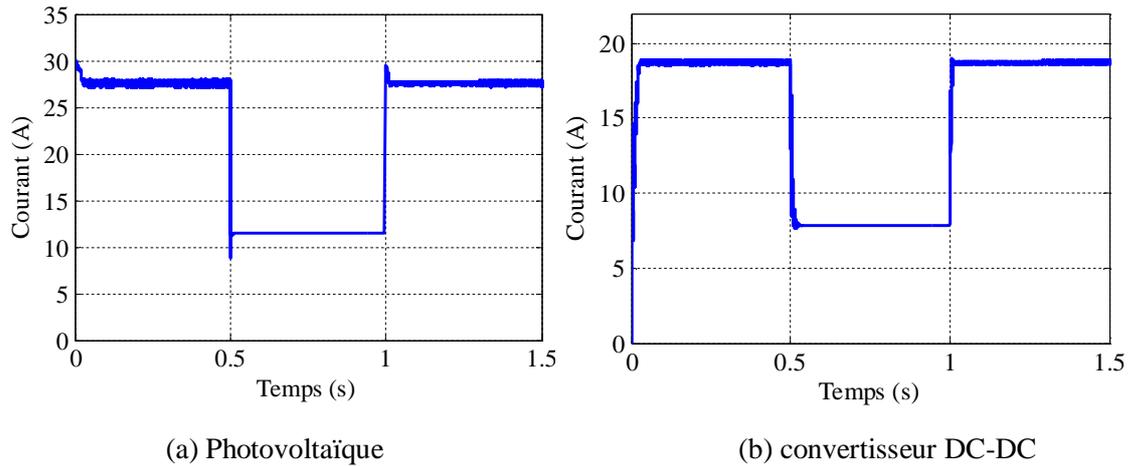


Figure V.41 : courant de la sortie photovoltaïque et de la sortie du convertisseur DC-DC.

Dans la figure (V.41), le courant du PV change lorsque l'irradiation change. Le courant du PV atteint l'état d'équilibre après 0,03 s. De plus, le courant oscille autour du MPP. Lorsque l'irradiation chute, le courant diminue de 27.9 A à 11.47 A. Le courant à 27.47 A est le courant maximum du PV sous 400 W / m<sup>2</sup> d'irradiation. Le MPPT peut suivre la puissance maximale presque instantanément.

On remarque aussi que l'hacheur (boost) se comporte comme un transformateur de puissance élévateur, où il maintient la puissance toujours à (7.5 Kw) figures ((V.39-a) et (V.39-b)) et augmenter la tension figure (V.40-b) et diminuer le courant du GPV figure (V-41-b).

#### V.5.1.14.2. Classique avec un pas de perturbation variable (PPV)

Cette méthode permet de résoudre efficacement la vitesse de poursuite et la précision du suivi du point maximal de la puissance comparé par la méthode P&O(PPF) classique [120]. L'amélioration de la vitesse de poursuite, c'est pour éviter les erreurs de jugement et les oscillations de puissance maximale.

Dans cette section, nous allons présenter l'organigramme de la commande P&O(PPV) classique et une étude comparative par logiciel MATLAB/SIMULINK entre cette méthode et la méthode P&O(PPF) classique pour vérifier leur efficacité pour améliorer le temps de réponse et la minimisation de l'oscillation autour de la puissance maximale voir figure (V.42).

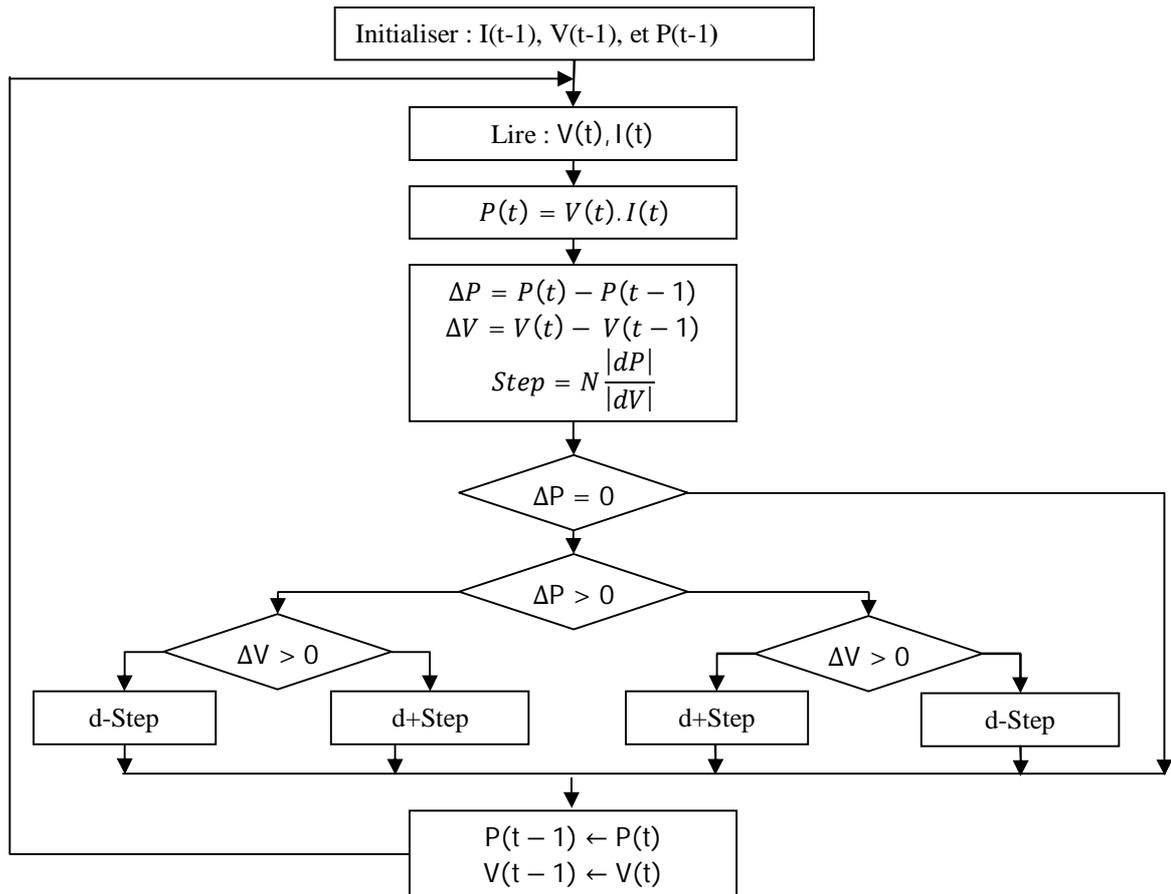


Figure V.42 : Organigramme de la commande P&O(PPV) classique.

Sous l'irradiation variable, pendant 1.5s. La figure (V.43) montre que les deux commandes poursuivent parfaitement,

On remarque à partir de la figure (V.43) (Zoom) que le régime transitoire est plus long, pour le système régulé par l'algorithme P&O(PPF) classique, que celui régulé par P&O(PPV) classique.

En régime permanent, la P&O(PPV) classique reste efficace pour poursuivre le point maximal sans oscillation autour de MPP, mais ce que nous remarquons est qu'une fois qu'un changement rapide de l'irradiation se produit, cette dernière perd complètement le sens du mode de recherche de MPP et cela crée une perte d'énergie.

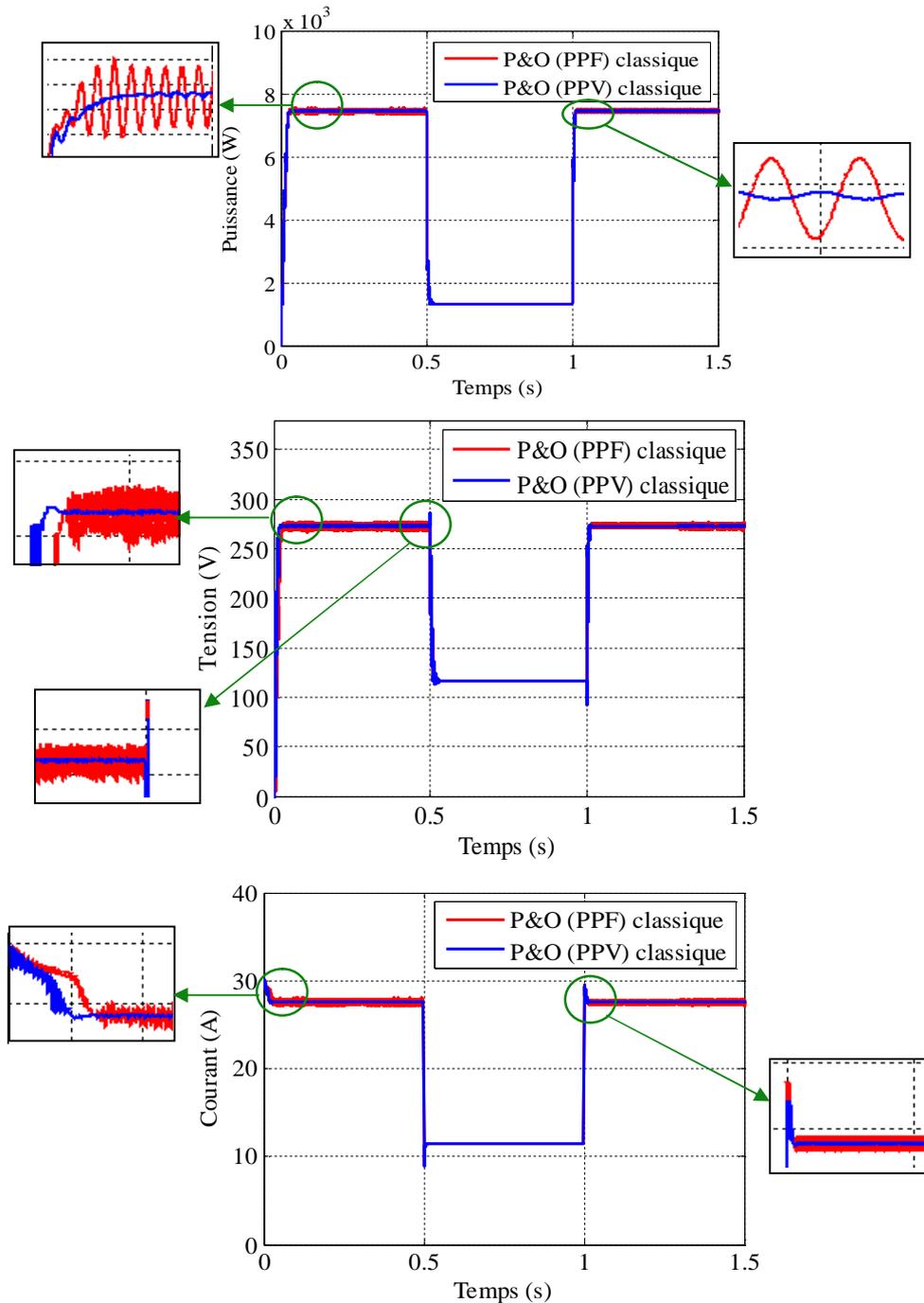


Figure V.43 : Comparaison entre P&O(PPF) et P&O(PPV) dans des conditions climatiques changeantes.

### V.5.1.14.3. Elimination de déviation du mode de recherche de MPPT

#### A. La déviation du mode de recherche

L'augmentation et la diminution rapides et successives de l'éclairement provoquent le problème de la déviation du mode recherche de MPP dû à l'algorithme P&O classique qui est incapable de reconnaître que le changement de puissance provient d'un changement climatique ou de perturbation [121]. Supposons qu'il y ait une augmentation du niveau

d'éclairement, tandis que le système PV fonctionne au point MPP1 à la perturbation  $j$  comme indiqué sur la figure (V.44), le point de fonctionnement sera déplacé vers un nouveau point 2 dans la courbe d'éclairement correspondant à un changement négatif de la puissance ( $dP$ ) et la tension ( $dV$ ). L'information de changement négatif pendant la perturbation  $t+1$  fera que l'algorithme décrémentera le pas de perturbation au lieu de l'incrémenter et déplacera le point de fonctionnement du point 2 au point 3 comme montré sur la figure (V.44). Cette fausse décision causant le point de fonctionnement du système PV est loin de MPP en raison des changements rapides de l'irradiation comme le montre la Figure (V.45).

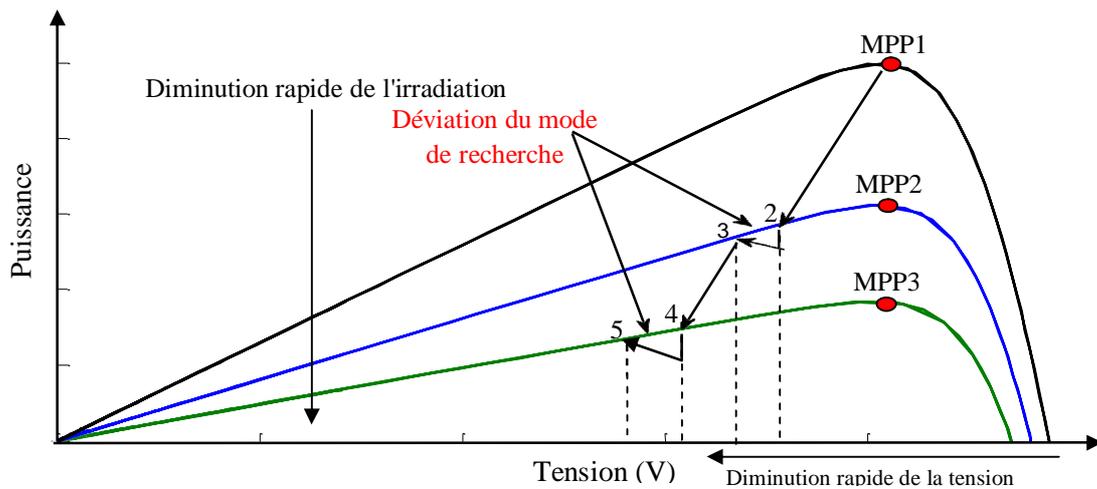


Figure V.44 : Diminution rapide de l'irradiation

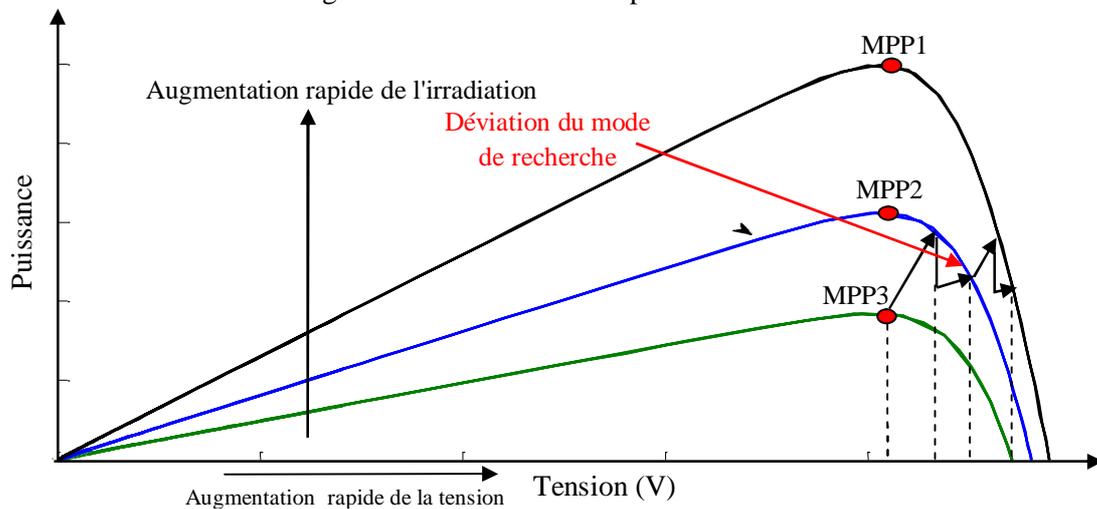


Figure V.45 : Augmentation rapide de l'irradiation.

### B. La commande P&O modifiée

La commande P&O classique est développée sur la base de l'observation de  $dP$  et  $dV$  en considérant les caractéristiques P-V du module PV [122]. Comme indiqué précédemment, la P&O classique souffre de la déviation du mode de recherche de MPP en cas d'un changement rapide de l'irradiation dû à une confusion, et cette confusion peut être éliminée en évaluant un autre paramètre  $dI$  (changement de courant).

Avec l'information de  $dV$ ,  $dP$  et  $dI$ , le phénomène de la déviation du mode de recherche de MPP est évité en cas de variation rapide de l'irradiation.

Les caractéristiques I-V du module PV et le changement de point de fonctionnement dû à un changement de l'irradiation sont montrés sur la figure (V.46).

Comme le montre la figure (V.46), en supposant qu'il y ait une diminution de l'éclairement au point 2, puis ce point va se fixer à un nouveau point 3 dans la nouvelle courbe d'éclairement. Maintenant, la décision doit être prise par l'algorithme au point 3, où  $dI < 0$  comme indiqué sur la figure (V.46). En même temps sur les caractéristiques P-V au point 3, à la fois  $dP < 0$  et  $dV < 0$  comme montré dans la figure (V.46). Ainsi, les trois paramètres  $dP$ ,  $dV$  et  $dI$  sont négatifs au point 3 comme montrent les figures (V.46) et (V.47).

Ainsi, la valeur négative de  $dP$  est due de la perturbation ou la diminution de l'irradiation qui peut être détectée en utilisant le paramètre supplémentaire  $dI$ . Les deux  $dP$ ,  $dV$  et  $dI$  ne seront négatifs que pour une diminution de l'éclairement comme le montre la figure (V.46). Ainsi, une diminution de l'irradiation peut être détectée en utilisant le paramètre additionnel  $dI$ , et ainsi la décrémentation du rapport cyclique par nouveau pas variable  $\Delta d_n$  où il est capable d'éliminer la déviation du mode de recherche de MPP en rapprochant le point de fonctionnement du MPP comme indiqué sur la figure (V.47). De même, en cas d'augmentation de l'irradiation, la commande P&O modifié a détecté que  $dP$ ,  $dV$  et  $dI$  sont négatifs et augmenté donc le rapport cyclique par  $\Delta d_n$ .  $\Delta d_n$  est un pas variable qui peut être exprimé par l'équation (V.36) [123].

$$\Delta d_n = \pm M |\Delta G| \tag{V.36}$$

$M$  est un paramètre constant et  $\Delta G$  représente le changement d'irradiation. Les organigrammes de cette technique MPPT de P&O(PPF) sont représentée sur la figure (V.48)

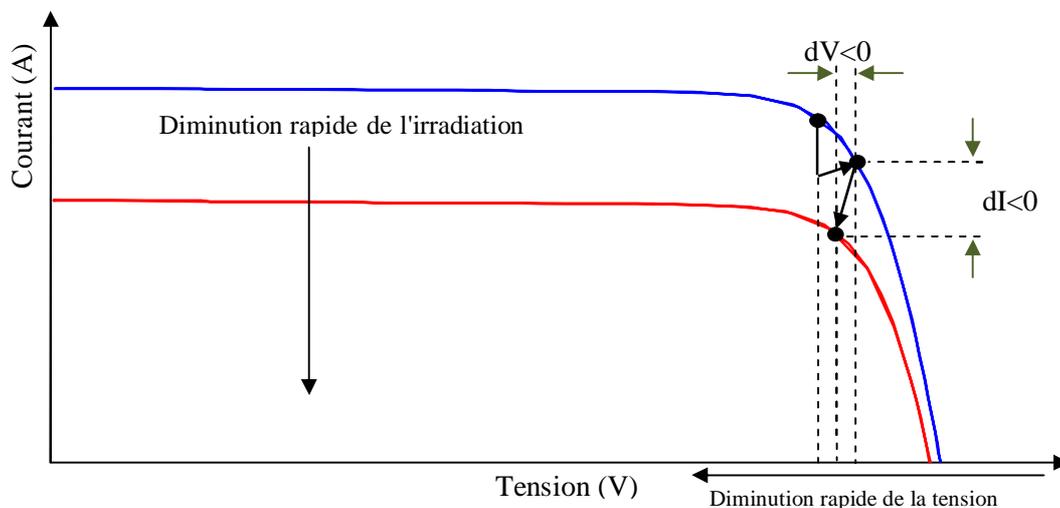


Figure V.46 : Observation du changement de courant.

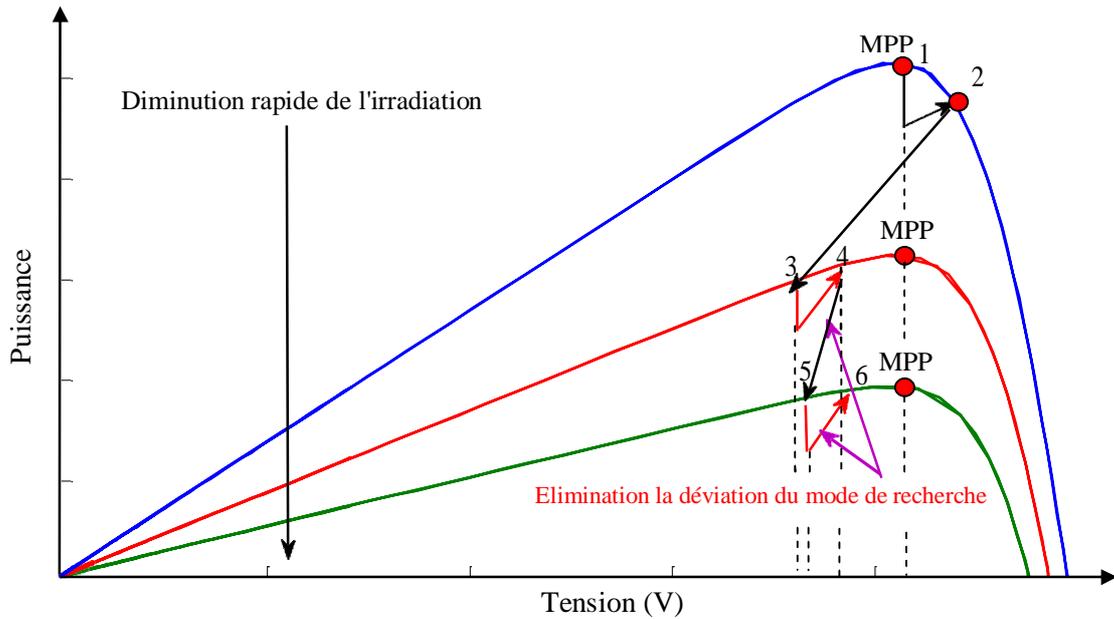


Figure V.47 : Élimination de déviation du mode de recherche de MPP.

La figure (V.48) représente l'organigramme de la commande P&O (PPF) modifiée [124].

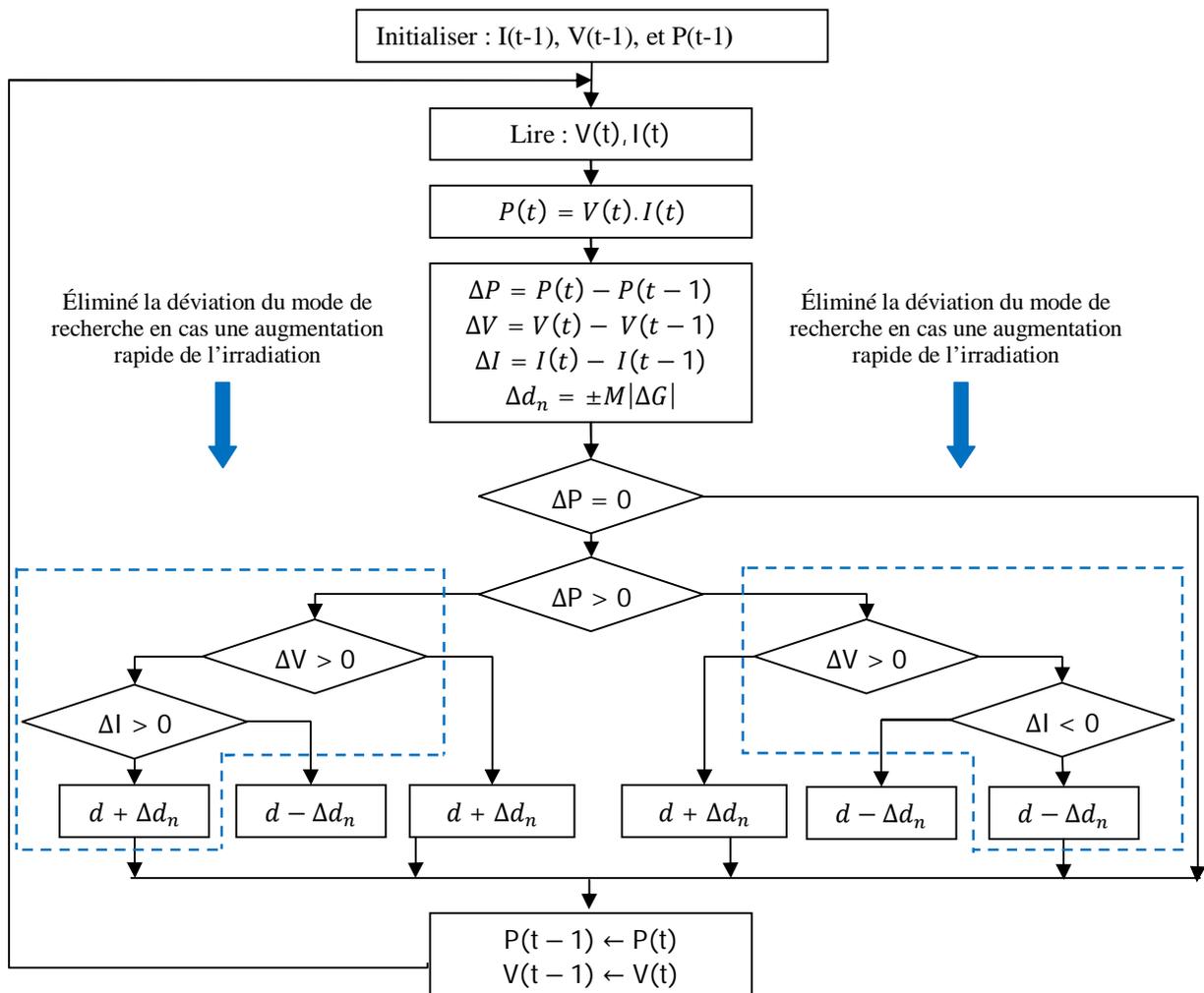


Figure V.48 : Organigramme de P&O(PPF) modifiée.

La figure (V.49) illustre la simulation de la commande P&O(PPF) modifié dans des conditions de changement climatique.

Nous observons à partir de la figure (V.49) que la commande P&O (PPF) modifiée a réussi à redresser le problème de la déviation du mode recherche de MPP en cas d'un changement rapide de l'irradiation.

Cependant, nous notons aussi à partir de la figure (V.49) que cette commande reste faible pour éliminer totalement l'oscillation autour de la puissance maximale malgré l'application de la modification.

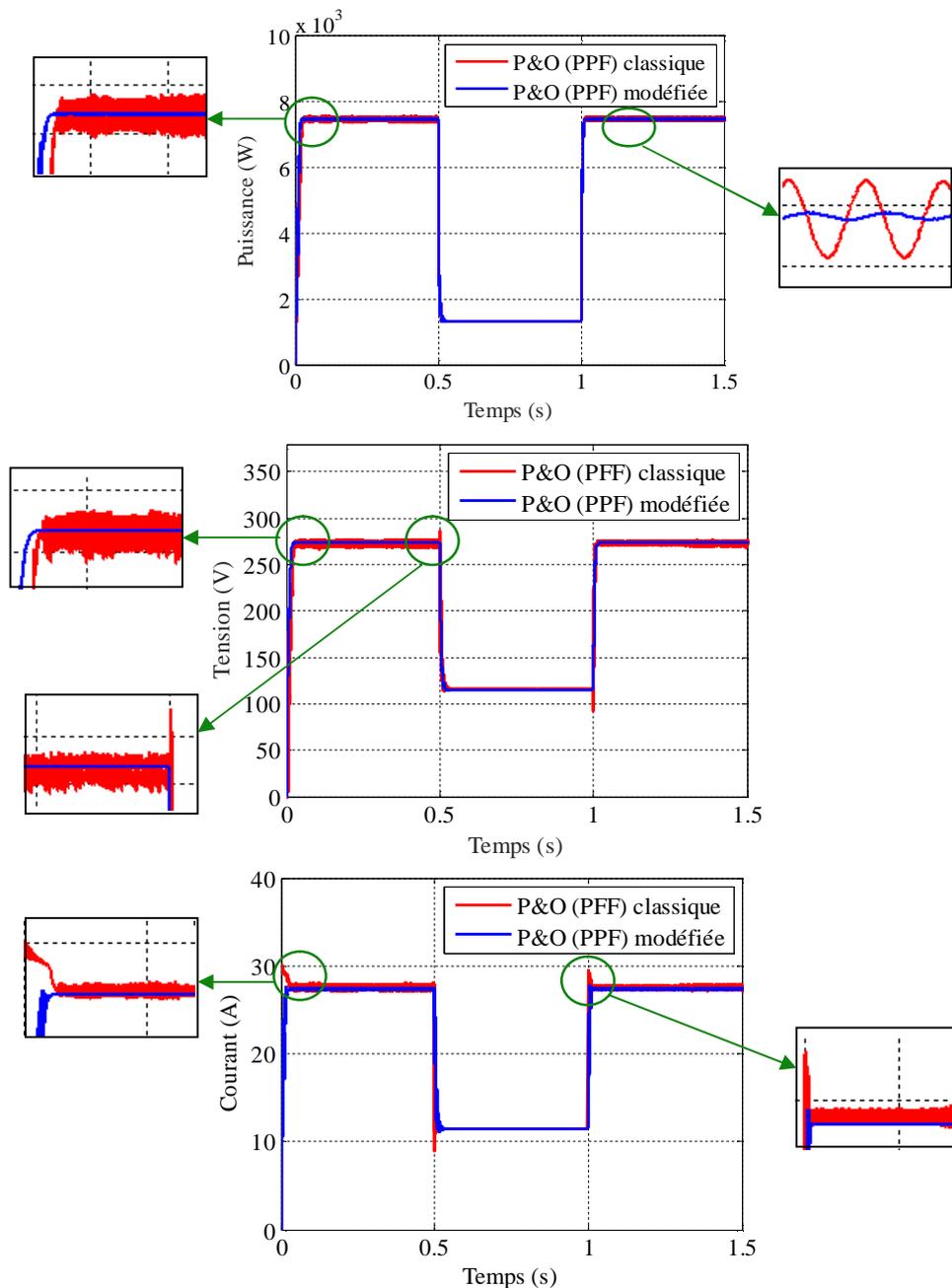


Figure V.49 : Comparaison entre P&O(PPF) classique et P&O(PPF) modifiée dans des conditions climatiques variables.

### V.5.2. Le générateur diesel

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (figure (V.50)). La fréquence du courant alternatif à la sortie est imposée par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel [125]. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau (ou charge) est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

Les réseaux du courant alternatif avec générateur diesel et analogue à ceux interconnectés, fournissent à leurs charges, deux formes d'énergie, active et réactive. L'énergie active se transforme au sein de l'outil de production en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc... Par contre l'énergie réactive sert principalement à alimenter les circuits magnétiques des moteurs électriques et autotransformateurs etc... En effet, cette forme d'énergie n'est pas consommée, mais les courants associés à la puissance réactive augmentent les pertes du système.

Quand un nombre élevé de générateurs diesels sont connectés au réseau, d'abord sont reliés à un bus à courant alternatif (CA) et puis le réseau, dans ce cas un système de commande est intégré pour la distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels. Le système de commande le plus répandu est le système numérique.

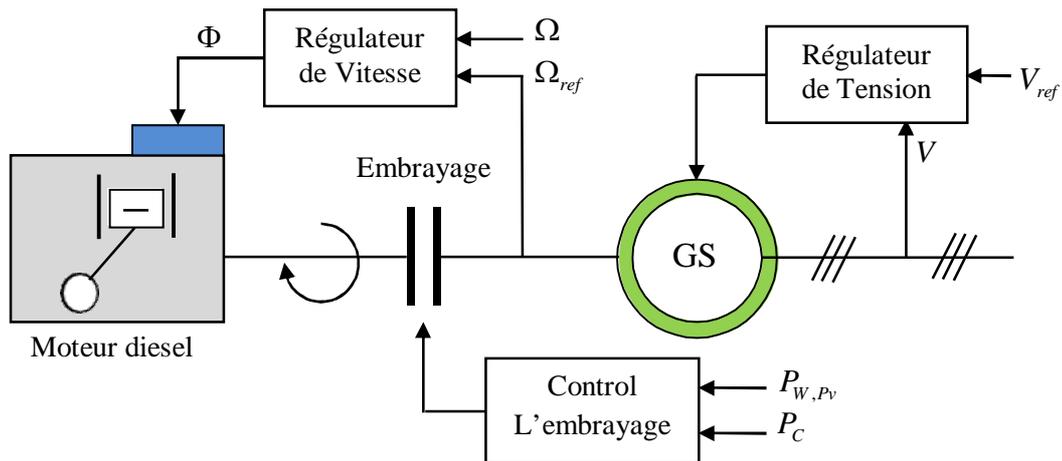


Figure V.50 : Configuration du groupe électrogène.

Tel que :

$V_{ref}$  : Tension de référence.

$v_s$  : Tension du réseau.

$\Omega_{ref}$  : Vitesse de rotation de référence.

$\Omega$  : Vitesse de rotation du rotor synchrone.

$\Phi$  : Débit du carburant.

$C_{mech}$  : Couple mécanique produit par le moteur diesel.

La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend de la quantité de carburant injecté et de la charge appliquée au vilebrequin du moteur. Le moteur diesel est un système non linéaire, il présente des temps morts et des retards ce qui rend difficile son contrôle. Les moteurs diesels sont munis d'un régulateur de vitesse : mécanique, électromécanique ou électronique. Celui-ci réalise le contrôle automatique de la vitesse du moteur diesel en réglant l'injection du carburant en fonction de la charge, il agit sur le mécanisme d'accélération.

Le bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié est illustré sur la Figure (V.51)

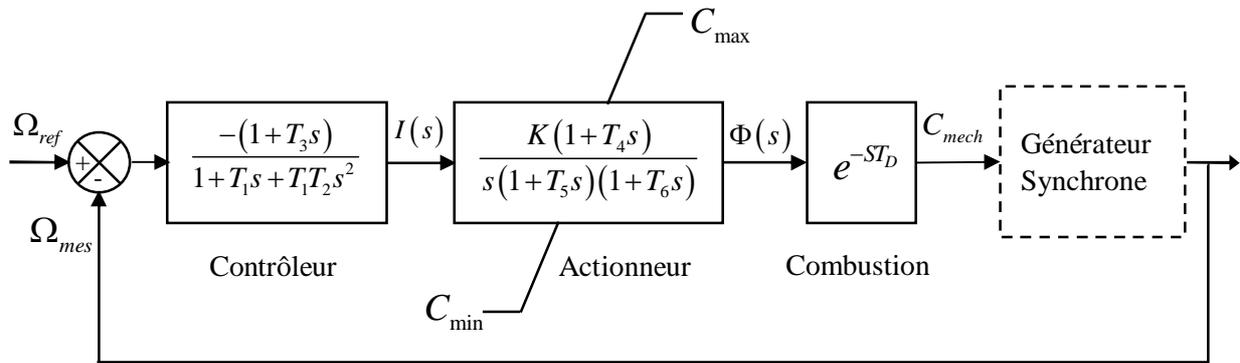


Figure V.51 : Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié.

L'entrée de contrôleur de la vitesse représente une ligne de vitesse de rotation et sa sortie représente un signal de commande pour l'opérateur mécanique ( $I_s$ ) que le fonctionnement dynamique de ce dernier ( l'opérateur mécanique qui représente l'arbre du moteur qui connecter à la charge) a exprimé en fonction de la conversion au coefficient du vent ( $K$ ) exprimé par la relation entre le couple et la quantité de carburant consommé [126], et résumées comme suit :

$$G(s) = \frac{K(1+T_4)}{s(1+sT_5)(1+sT_6)} I_s \quad (V.37)$$

Le bloc combustion inclut un retard qui représente le temps nécessaire pour que le moteur diesel réponde à une demande de modification du taux d'injection de carburant ; ce temps mort  $T_D$  est le résultat de la position de plusieurs cylindres qui ne sont pas acceptés la quantité de carburant à un instant donné. Le délai peut être exprimé comme étant le temps réel

entre les arrivées consécutives des pistons au point d'injection plus approximativement un quart de tour du vilebrequin du couple produit par le moteur diesel.

$C_{mech}$  est une fonction du débit de carburant  $\Phi(s)$  :

$$C_{mech} = e^{-sT_D} \Phi(s) \quad (V.38)$$

La consommation horaire de carburant du générateur diesel  $Cons(t)$  [l/h] peut être modélisée par la loi linéaire en fonction de la puissance de sortie requise par la charge [127] :

$$Cons(t) = \alpha_{GD} \cdot P_{GD}(t)_{gen} + \beta_{GD} \cdot P_{GD}(t)_{rat} \quad (V.39)$$

$\alpha_{GD}$  [l/kWh] et  $\beta_{GD}$  [l/kWh] sont les coefficients de la courbe de consommation fournies par le fabricant.

$P_{GD}(t)_{gen}$  [kW] : Puissance générée par le GD.

$P_{GD}(t)_{rat}$  [kW] : Puissance nominale de GD.

$\alpha_{GD}$  et  $\beta_{GD}$  sont les constantes qui sont égales à 0.246 l/kWh, 0.08145 l/kWh respectivement [127].

L'efficacité globale du générateur diesel est donnée par [128] :

$$\eta_T = \eta_{brake\_thermal} \times \eta_{generator} \quad (V.40)$$

Où  $\eta_{brake}$  est le rendement thermique du frein du générateur. Normalement, les générateurs diesel sont modélisés dans le contrôle d'un système hybride pour atteindre l'autonomie requise. Il est économique d'utiliser le générateur à 70-90% pleine charge [129]. En l'absence de demande de pointe, des générateurs diesel sont normalement utilisés pour répondre aux exigences de la charge et la recharge de la batterie. Il peut aussi être commandé pour fonctionner en mode de distribution de puissance constante.

Le générateur doit avoir une durée de fonctionnement limitée pour réduire l'usure et la déchirure du fait que la durée de vie d'un générateur est inversement proportionnelle à l'énergie fournie par celle-ci.

Pour déterminer la capacité nominale du générateur à installer, les lignes directrices suivantes doivent être suivies [130] :

- ✓ Si le générateur est directement relié à la charge, alors sa puissance nominale doit être au moins égale à la charge maximale.
- ✓ Si le générateur est utilisé comme un chargeur de batterie, le courant produit ne doit pas être supérieure à CAh/5A, où CAh est la capacité en ampère -heure de la batterie.

Dans le cas d'un réseau isolé ayant comme source principale le générateur diesel celui-ci est chargé de fixer la fréquence du réseau et de garder l'amplitude de la tension constante. Pour le SEH étudié dans cette thèse, la fréquence et l'amplitude de la tension sont fixées par l'onduleur, ce qui permet au GD de fonctionner à puissance constante et d'être arrêté si nécessaire. Par conséquent, le modèle du moteur diesel se réduit à une constante qui fixe la puissance de la machine synchrone.

### V.5.2.1. Modèle simplifié de la machine synchrone

La puissance mécanique fournie en sortie du bloc « moteur diesel » est convertie en puissance électrique par un modèle simplifié [131] de la machine synchrone. Les parties mécaniques et électriques de la machine sont modélisées dans le même bloc.

Le rotor de la machine synchrone est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation  $I_{ex}$  continu créant un champ magnétique  $2p$  polaire. Il possède donc '  $p$  ' paires de pôles, le même nombre de pôles se retrouve dans le stator. Ses enroulements sont le siège de courants alternatifs triphasés sachant que la liaison entre la pulsation  $\omega_g$  du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_g}{p} \quad (V.41)$$

Avec  $\omega_g = 2\pi f$  où  $f$  est la fréquence des courants alternatifs en [Hz].

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une force électromotrice  $e(t)$  de valeur efficace  $E$  :

$$E = K \cdot N \cdot \Phi \cdot f = K \cdot N \cdot \Phi \cdot p \cdot n_s = K' \cdot \Phi \cdot n_s \quad (V.42)$$

Où:

$K$  : Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

$N$ : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

$\Phi$ : Flux maximum à travers un enroulement [Wb]

$n_s$  : Vitesse de rotation [tr/min]

$K' = K.N.p$ : Constante globale (caractéristique de la machine)

Le modèle équivalent d'un enroulement du générateur synchrone est présenté sur la Figure (V.52)

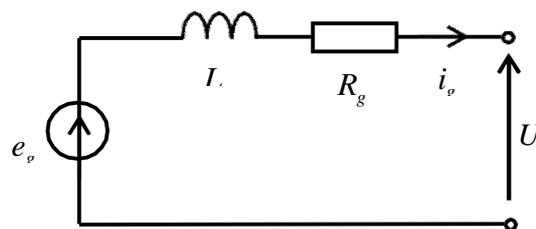


Figure V.52 : Modèle équivalent d'un enroulement.

Où :

$e_g$  : F.é.m. à vide [V]

V: Tension aux bornes d'un enroulement de la machine [V].

$R_g$  : Résistance de l'enroulement

$L_g$  : Inductance synchrone [H]

La loi des mailles pour le schéma présenté dans la Figure (V.53) avec les grandeurs instantanées est :

$$e_g = v_g + L_g \frac{di_g}{dt} + R_g \cdot i_g \quad (\text{V.43})$$

En triphasé, le stator comporte trois enroulements et donc trois forces électromotrices  $e_{g1}(t)$ ,  $e_{g2}(t)$  et  $e_{g3}(t)$  de même valeur efficace E et déphasées de  $2\pi/3$ .

Dans le modèle simplifié de la machine synchrone, la partie mécanique sans frottement est décrite par l'équation:

$$J_{ds} \frac{d\Omega_s}{dt} = C_d - C_{em} \quad (\text{V.44})$$

Où :

$J_{ds}$  : L'inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur synchrone.

$\Omega_s$  : Vitesse de rotation.

$C_d$  : Couple mécanique sur l'arbre.

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

### V.5.2.2. Système embrayage

Système embrayage qui permet la séparation du moteur Diesel par le générateur synchrone dans l'état de fonctionnement du système hybride (éolienne, photovoltaïque, Diesel) par (éolienne+ photovoltaïque).

Le système hybride (éolienne+ photovoltaïque+ diesel) fonctionne selon huit modes (éolienne, photovoltaïque, diesel, éolienne+ photovoltaïque, éolienne + Diesel, photovoltaïque+ Diesel, éolienne+ photovoltaïque+ diesel, diesel), et que la transition du fonctionnement du système par le générateur diesel à l'éolienne ou photovoltaïque doit être exige la séparation du moteur Diesel par le système. Grâce à un système embrayage qui installé entre moteur diesel et le générateur synchrone, destinée principalement sur la comparaison entre la valeur de la puissance produit par le générateur diesel (PW) et la puissance consommée par la charge principale (Pc)

De telle sorte :

- $(P_{W,Pv} \geq P_C)$  le système embrayage est ouvert c- a- d le système (éolienne, photovoltaïque) est suffisante pour alimenter la charge
- $(P_{W,Pv} < P_C)$  le système embrayage est toujours fermé.

### V.5.2.3. Simulation du groupe électrogène

Le modèle du GD est donné dans la Figure (V.50). Il est validé par simulation pour assurer le bon fonctionnement des régulateurs de tension et de vitesse. Les paramètres du modèle sont les mêmes qui sont donnés dans L'ANNEXE 3. Dans cette configuration le système fourni de l'énergie électrique à l'aide d'un groupe électrogène constitué d'un moteur diesel et une génératrice synchrone à aimant permanent d'une puissance apparente de 12kVA, ce système est connecté à une charge principale de 9.6kW.

La charge primaire étant 3kW jusqu'à  $t=3s$ , à cet instant on ajoute une autre charge pour voir une charge de 6kW et à  $t=6s$  une totalité de charge est atteindres les 9.6kW. (Figure V.53)

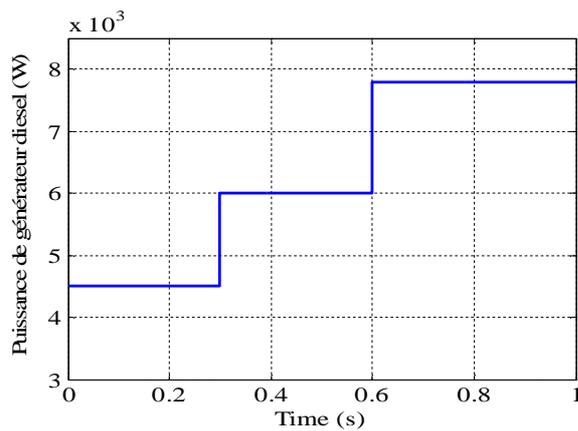


Figure V.53 : La charge.

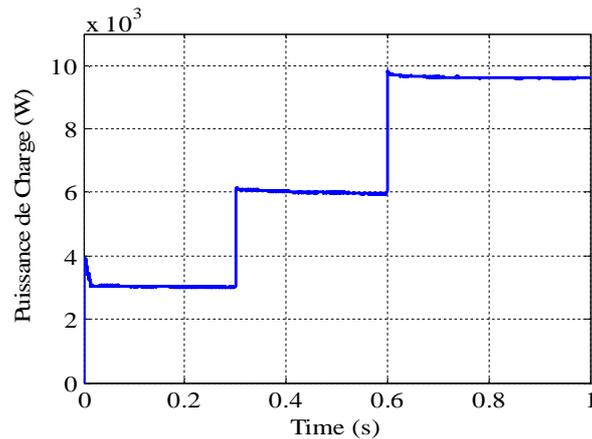


Figure V.54 : La puissance générée par le GD

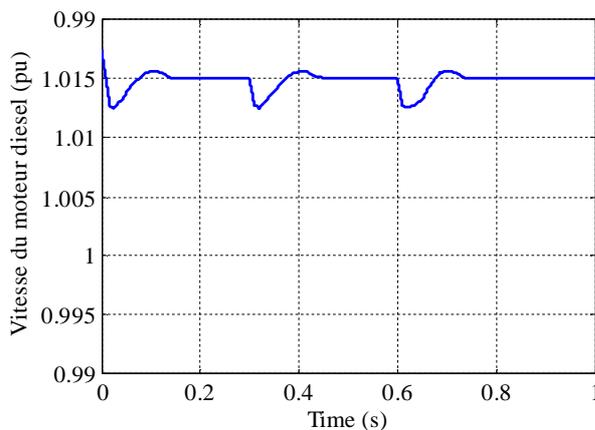


Figure V.55 : La vitesse du moteur diesel

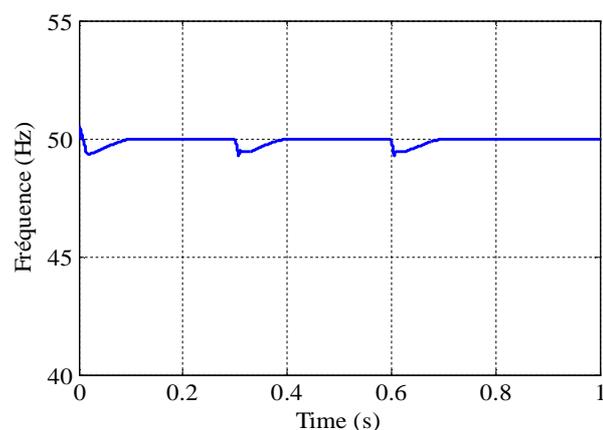


Figure V.56 : La fréquence du système

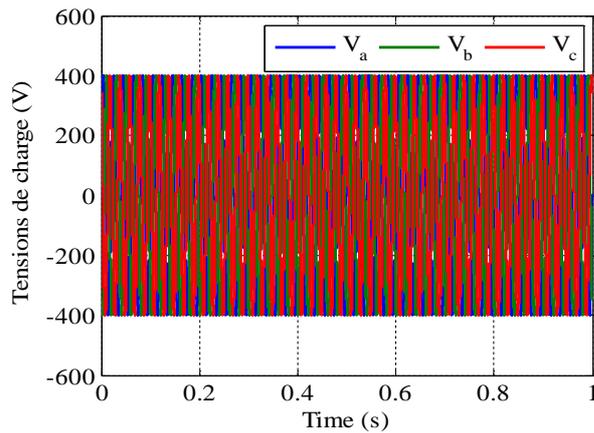


Figure V.57 : Les tensions de charge

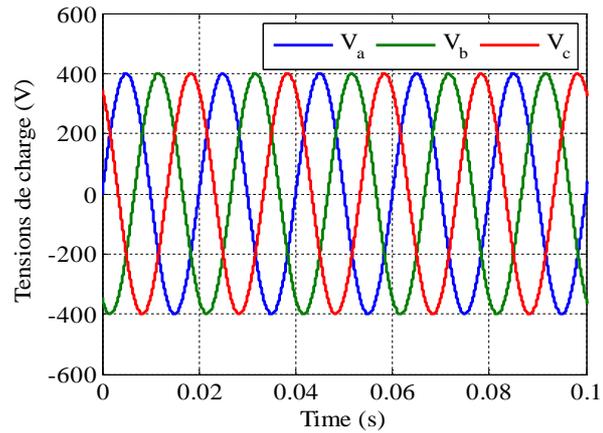


Figure V.57 : Zoom des tensions de charge

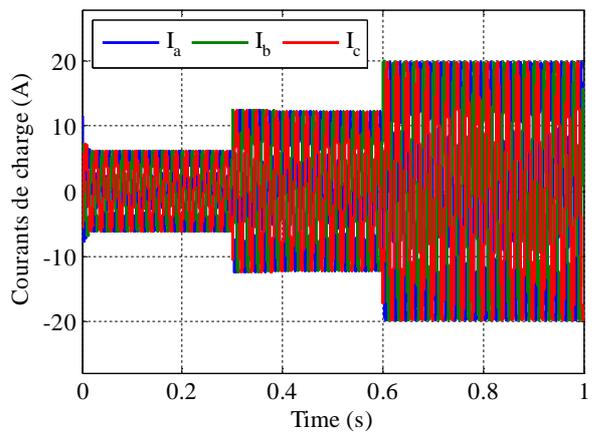


Figure V.58 : Les courants de charge

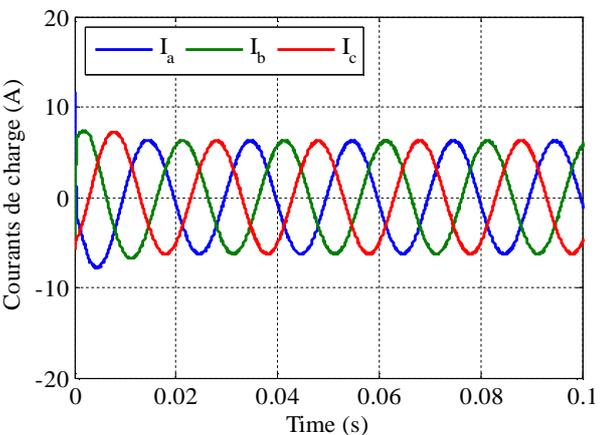


Figure V.58 : Zoom des courants de charge

D'après les résultats de simulation, on remarque que le moteur tourne à une vitesse presque constante (figure V.55), avec des quelques fluctuations dans sa forme quand la charge demandée dans le système est variée (figure V.53). Ce qui est bien montré sur la (figure V.56) où la fréquence reste autour 50Hz grâce au régulateur de vitesse.

La puissance générée par le groupe diesel suit parfaitement la variation de la charge demandée, ce qui traduit le bon fonctionnement du groupe diesel au niveau de la génération de l'énergie (figure V.54).

Les figures (V.57) montrent que le régulateur de la tension joue son rôle important, puisque les formes de la tension et des courants (figure V.57 à la figure V.58) gardent des formes sinusoïdales.

### V.5.3. Systèmes de stockage

L'énergie électrique est une énergie qui ne peut être stockée qu'en quantité modérée pour un cout raisonnable. Dans les systèmes isolés, des batteries sont souvent utilisées pour garantir l'équilibre production/consommation et pour lisser les variations de puissance. Le stockage d'énergie le plus utilisé est la batterie. Toute batterie est un ensemble de cellules

électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie (Figure (V.59)). La capacité énergétique de la batterie (exprimée en wattheures, Wh) dépend des quantités et de la nature des éléments chimiques compris dans la cellule.

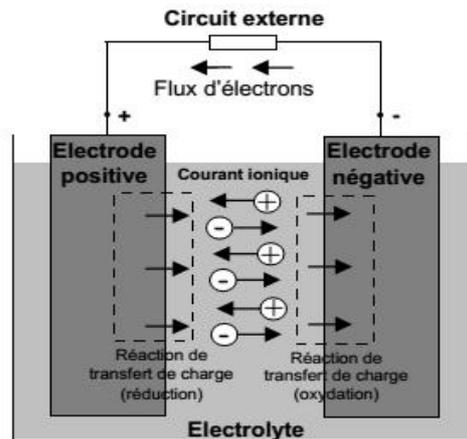


Figure V.59: Cellule électrochimique de base.

L'anode est l'électrode à laquelle l'oxydation (perte d'un ou plusieurs électrons) se produit et à partir de laquelle les électrons vont alimenter le circuit extérieur (la charge). La cathode est l'électrode à laquelle se produit la réduction (gain d'un ou plusieurs électrons) ; les électrons revenant de la charge arrivent sur cette électrode. En décharge, l'anode est la borne négative de la batterie et la cathode la borne positive. Par contre, en charge, l'électrode négative est la cathode et l'électrode positive est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens. Les paramètres électriques suivants sont généralement employés pour caractériser une batterie :

- La capacité nominale  $q_{nom}$  est le nombre d'ampères-heures (Ah) qui peut être extrait de la batterie, dans des conditions de décharge prédéterminées.
- L'état de charge SOC (State-of-charge) est le rapport entre la capacité présente et la capacité nominale :  $SOC = q/q_{nom}$  ( $0 < SOC < 1$ ). Si  $SOC = 1$ , la batterie est totalement chargée si  $SOC = 0$ , la batterie est totalement déchargée.
- Le régime de charge (ou décharge) est le paramètre qui reflète le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel celle-ci est chargée (ou déchargée). Il est exprimé en heures. Par exemple, pour une batterie de 150Ah déchargée à 5A, le régime de décharge est 30h.

La durée de vie est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale.

Malgré le problème de capacité et de durée de vie, la batterie plomb-acide est la solution la plus utilisée pour le système de stockage des sites isolés pour son prix très concurrentiel et sa robustesse. C'est pour ces raisons que nous avons choisi dans cette thèse d'utiliser des batteries plomb-acide pour le système de stockage, comme le prouve la figure (V.60).

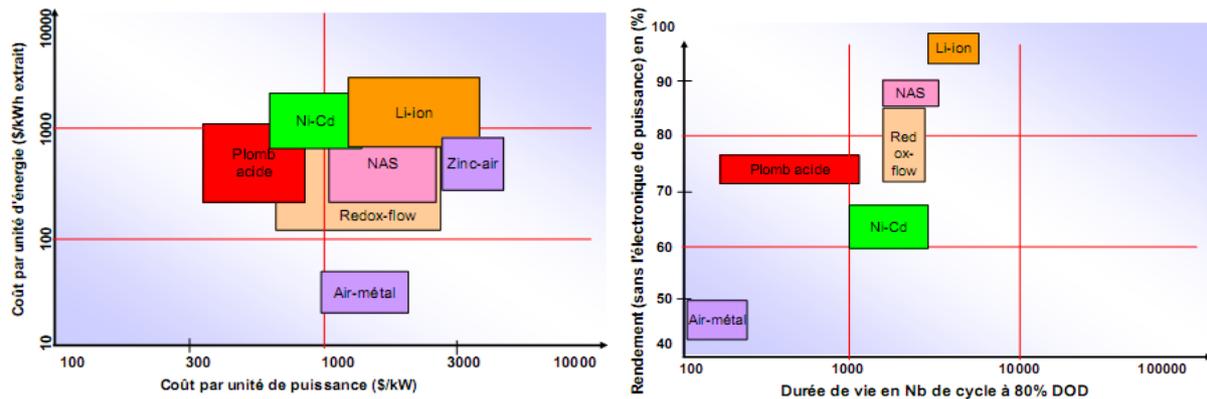


Figure V.60: Coûts ; durée de vie et rendement des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques.

L'utilisation du moyen de stockage d'électricité est très variée; elle dépend de la nature des besoins et du type d'applications. En particulier, les SEH géographiquement isolés et non raccordés au réseau, qui intègrent au moins une source d'ER nécessitant un système de stockage. Deux types de stockage sont utilisés dans les SEH : le stockage à court terme et le stockage à long terme.

- La stratégie de stockage à court terme permet de filtrer les fluctuations des ER, cette stratégie réduit également le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels, donc la consommation de carburant. Par contre,
- Le stockage à long terme est utilisé pour assurer une continuité d'approvisionnement de l'énergie pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours).

Le système de stockage peut être aussi utilisé avec les systèmes raccordés au réseau électrique, afin d'éliminer les fluctuations de puissance à court terme, de plus d'assurer la continuité du service en cas de défaillance du réseau.

### V.5.3.1. Technologies des systèmes de stockage

Le stockage de l'énergie est une action qui permet de placer une quantité d'énergie dans un lieu donné afin de l'utiliser ultérieurement. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée. L'énergie électrique

peut être stockée sous différentes formes: mécanique, électromagnétique, électrochimique et thermique. Une classification des technologies de stockage d'énergie est présentée à la figure (V.61).

- Les technologies de stockage mécanique sont : le stockage hydroélectrique par pompage (PHS), le stockage d'énergie par air comprimé (CAES) et le stockage d'énergie par volant d'inertie (FES).
- Les technologies de stockage électromagnétique représentées sont des super-condensateurs et le stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES).
- Les technologies électrochimiques sont divisées en stockage à base d'hydrogène, batteries à air et stockage d'énergie par batterie (BES). Le BES peut être distingué en batteries plomb-acide (Pb-acide), en batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd) ou en nickel-métal-hydrure (Ni-MH), en soufre (NaS) et en batteries lithium-ion (Li-ion).
- Le stockage d'énergie du principe de fonctionnement thermique est formé par le stockage d'énergie thermoélectrique à haute température (HT-TES) et le stockage d'énergie thermoélectrique à basse température (LT-TES)

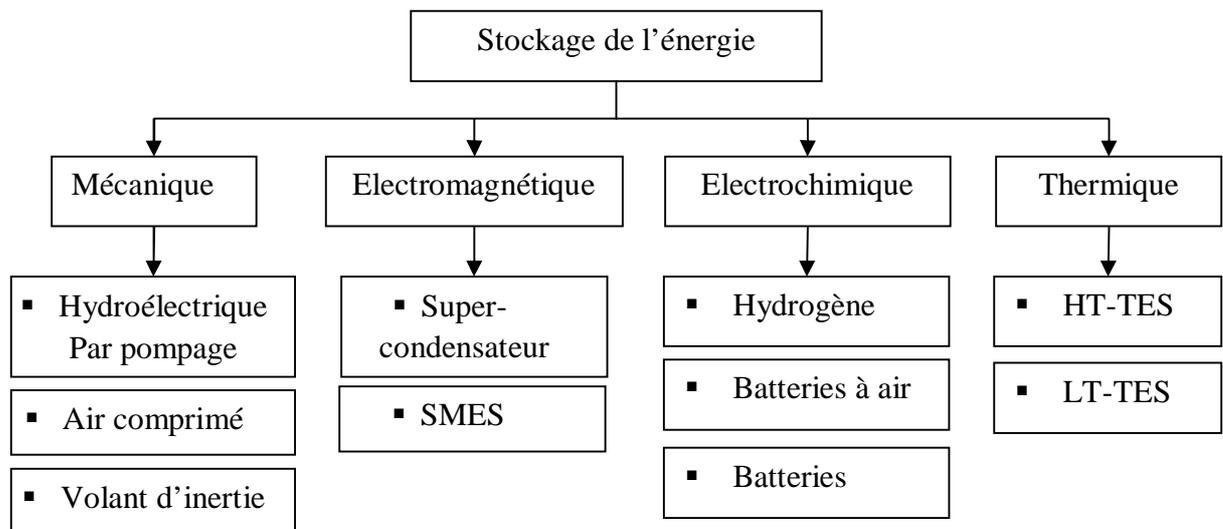


Figure V.61 : Classification des technologies de système de stockage.

De nos jours, les technologies les plus émergentes dans les SEH sont les technologies électrochimiques et principalement les systèmes de stockage d'énergie à batterie. En particulier les trois types des batteries : plomb-acide, nickel-cadmium et lithium-ion, en raison de leurs maturités et de leurs faibles coûts. Ils présentent la propriété de pouvoir transformer de l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques en énergie électrique, sans émission de polluants.

#### a) Batterie au Plomb-acide (Pb-acide)

Elle présente plusieurs avantages, c'est la moins chère par rapport à d'autres technologies, elle est presque entièrement recyclable (plus de 90%) et leur autodécharge est faible. Cependant, ce genre de batteries sont sensibles aux décharges trop profondes conduisant à une diminution importante de leur durée de vie.

#### b) Batterie au lithium-Ion (li-Ion)

Les performances de ce type sont bien meilleures que les autres. Leur autodécharge est très faible (1 % par mois), cela signifie que l'énergie massique stockée est relativement bien supérieure, caractérisée par une tension de fonctionnement élevée permettant la réduction du nombre d'éléments pour une tension donnée et leur durée de vie élevée; Mais le coût est beaucoup plus élevé à cause de leur fabrication qui nécessite un investissement bien supérieur que celui des batteries au Plomb. En plus, la batterie lithium contient un pourcentage élevé de métaux lourds et dangereux, en effet leur recyclage est compliqué et n'atteint pas la maturité.

#### c) Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd)

Elle est robuste, mais souffre d'un coût élevé, d'une tension de cellule relativement faible, une autodécharge assez rapide (20% par mois). Telle la batterie lithium-Ion, leur recyclage est compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant. À cause des limites des batteries au lithium-Ion et aux alcalines, nous préférons la batterie au plomb. Dans notre travail, nous proposons un système de contrôle de la charge et de la décharge de batteries, afin de prolonger la durée de vie et éviter la dégradation due aux décharges profondes ou des surcharges.

### V.5.3.2. Caractéristiques des batteries

Les paramètres techniques les plus représentatifs identifiés d'un accumulateur sont les suivants [132]:

- **Capacité nominale:** C'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah).
- **Tension d'utilisation :** C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- **Durée de vie et cycle de vie:** les deux caractéristiques définissent la durabilité d'un système de stockage. La durée de vie est mesurée en années. D'autre part, la durée de vie du cycle est mesurée dans les cycles de charge-décharge.

- **Profondeur de décharge** : La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisée pendant un cycle de charge/décharge.
- **Autodécharge**: définit l'énergie perdue par un système de stockage pendant le temps de non-utilisation. Ce paramètre est mesuré par la relation entre l'énergie perdue pendant une certaine période de temps (heure, jour ou mois) et la capacité énergétique du dispositif de stockage.
- **Rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- **Etat de charge (SOC)** : c'est la quantité d'énergie disponible divisée par la capacité nominale de la batterie. Si  $SOC = 1$ , la batterie est chargée et quand :  $SOC = 0$ , la batterie est vide.

#### V.5.4. Le régulateur de charge batteries

Le régulateur est un dispositif de contrôle de la charge et de la décharge profonde du parc batteries. Ce dispositif se trouve au cœur du système de génération d'énergie, il est indispensable pour protéger les batteries contre de probables surcharges afin d'éviter que la tension dépasse un certain seuil, si on laisse durer ce phénomène, les batteries deviendront surchargées, ce qui accélère la corrosion des plaques à plomb, fera perdre de l'électrolyte et endommage les plaques à plomb, par contre la protection contre les décharges profondes, le régulateur empêche les batteries d'être vidées pas plus de 60% à 70% de leurs charges.

#### V.5.5. Convertisseurs

Il existe différentes architectures des systèmes multi-sources comme on a vu précédemment. Cependant, l'objectif principal d'un tel système est de maximiser la production de puissance des sources. Pour cela, chacune est connectée à un convertisseur, qui permet de contrôler son point de fonctionnement et le relier au bus commun avec l'adaptation nécessaire. Différentes topologies de connexion des sources de production d'énergie, soit des sources d'ER ou des sources conventionnelles dans les SEH sont proposées dans la littérature. Cependant, le choix du convertisseur se fait selon :

- Configuration du bus dans le SEH où les sources sont connectées,
- Objectifs que l'on souhaite réaliser, par exemple : maximisation de la production de puissance des sources, adaptation de la tension....

Dans le cas d'un SEH autonome de structure à bus DC, un onduleur doit être utilisé pour alimenter une charge si elle est alternative.

### V.5.6. Le système de supervision

La commande d'un système hybride nécessite l'application d'un système de supervision. Un système de supervision est une entité dotée d'une intelligence lui permettant de gérer d'une manière efficace les interactions entre les différents éléments d'un système hybride. Il représente le cerveau du système hybride, il décide de l'entité à activer (générateur photovoltaïque, éolien, charge ou décharge de batteries, générateur diesel) en fonction de la demande de la charge et en fonction de la disponibilité des énergies renouvelables figurent (V.62).

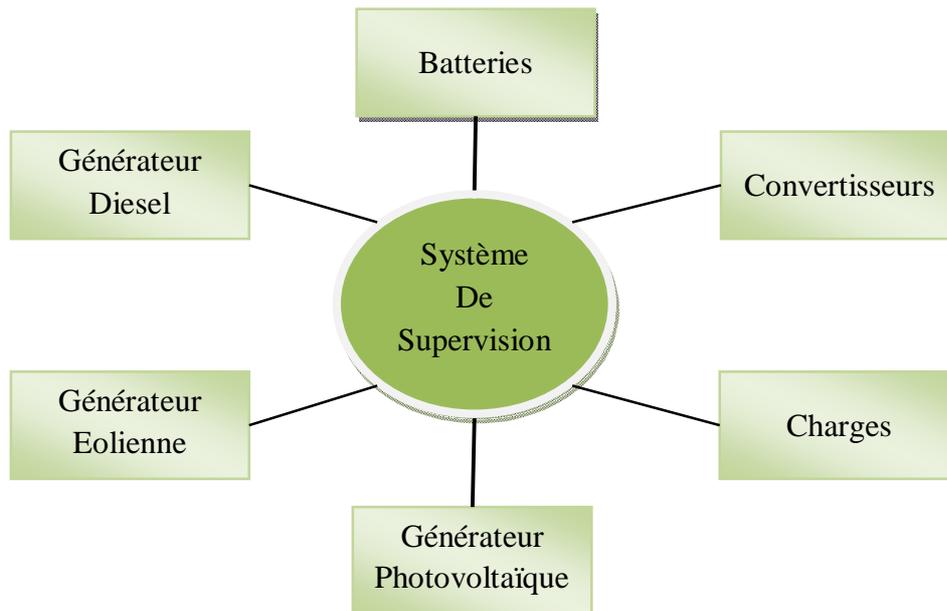


Figure V.62 : Système de supervision.

Plusieurs stratégies de gestion et de supervision sont proposées dans la littérature pour traiter les différentes problématiques propres aux différents systèmes multi-sources.

Dans [133], le système considéré est un système multi-sources composé de panneaux PV, un banc de batteries et d'une pile à combustible montés sur un bus continu à travers des convertisseurs adéquats. Le principe de fonctionnement de ce système consiste à charger les batteries lorsque la production des panneaux PV est supérieure à la consommation de la charge. À l'inverse, lorsque la consommation est plus élevée que la production, les batteries se déchargent pour compenser le manque d'énergie.

Dans [134], un autre algorithme de gestion et de supervision pour un système hybride éolienne/photovoltaïque a été présenté dans le cadre d'une application isolée. Les auteurs ont défini dans ce travail trois modes opératoires principaux qui permettent d'inclure tous les états et les scénarios auxquels le système hybride peut être amené à faire face. Le premier mode

consiste à utiliser une seule source pour satisfaire la demande de la charge, en l'occurrence ici la source éolienne. Le deuxième mode consiste à utiliser la source photovoltaïque en complément du premier mode. Le dernier mode utilise les deux sources au maximum et sollicite la batterie si besoin. Par conséquent, les auteurs n'ont pas prévu de source de secours pour pallier une éventuelle panne des sources ou des conditions météorologiques très défavorables.

### V.5.7. Les charge

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe deux charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et de courant pendant les changements dans le fonctionnement de système [135].

### V.6. Modélisation chaîne de stockage

La chaîne de stockage illustrée dans la figure (V.63) est composée de :

- ✓ Une batterie de type **LITHIUM-ION** que nous avons initialement chargée.
- ✓ Un convertisseur DC/DC bidirectionnel qui permet la charge et la décharge de la batterie.

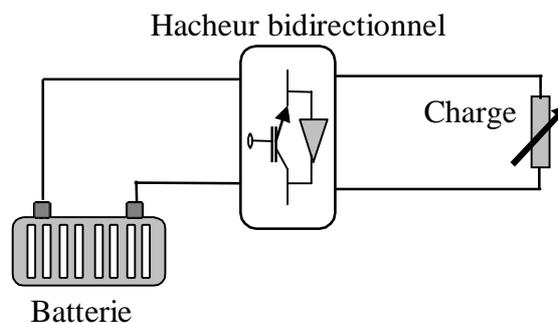


Figure V.63 : Schéma du système de stockage.

#### V.6.1. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel

Le hacheur utilisé pour réaliser la charge et la décharge de la batterie ainsi que le transfert de puissance (courant) doit être réversible. Son schéma électrique équivalent est donné par la figure (V.64). Afin de réaliser la réversibilité du flux de puissance, les commutateurs du convertisseur doivent idéalement transférer le courant dans les deux directions. La première direction correspond au mode décharge. Le convertisseur transfère l'énergie de la batterie vers le bus CC lorsque la production d'énergie renouvelable est

déficitaire. Le second représente le mode charge. Quand il y a un excès de production d'énergie renouvelable, le convertisseur bidirectionnel transfère l'excès de puissance du bus CC vers la batterie. Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme convertisseur élévateur (boost) pendant la décharge de la batterie et comme convertisseur abaisseur (buck) pendant la charge de la batterie. Dans les deux modes de fonctionnement (charge et décharge), le convertisseur bidirectionnel régule la tension du bus CC et contrôle le flux de puissance [136].

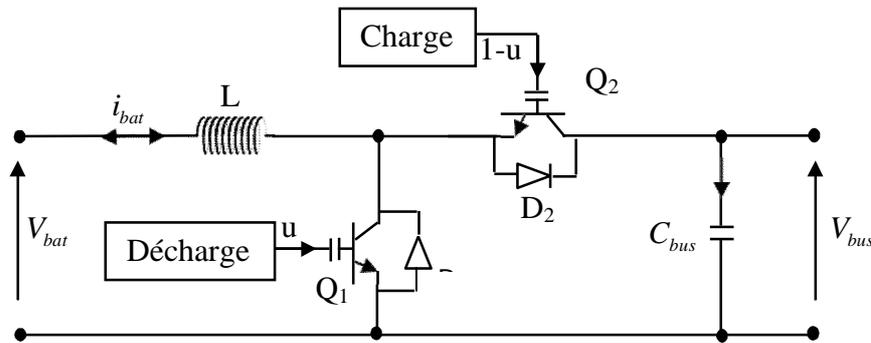


Figure V.64 : Schéma électrique du convertisseur DC/DC bidirectionnel.

À noter que la commande des interrupteurs  $Q_1$  et  $Q_2$  est réalisé simultanément avec deux signaux (rapports cycliques) complémentaires ( $u$ ) et ( $1-u$ ). Le modèle du convertisseur bidirectionnel est donné par le système d'équations (V.45). [137]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} [V_{bat} - (1-u)V_{bus}] \\ \frac{d}{dt} V_{bus} = \frac{1}{C_{bus}} [(1-u)i_L - i_0] \end{cases} \quad (V.45)$$

Où :  $i_L = i_{Bat}$

### V.6.2. Commande du système de stockage

La stratégie de commande du convertisseur bidirectionnel comporte deux objectifs : le premier est le contrôle du sens du flux de puissance. C'est-à-dire décider quand la batterie va jouer le rôle d'une source d'énergie, et lorsqu'elle est plutôt en mode charge (stockage d'énergie) tout cela en fonction de l'évolution de l'état du système Hybride. Cet objectif est dicté en réalité, par l'algorithme de gestion qui décide dans quelle configuration la batterie doit fonctionner. Le deuxième objectif est de régler la tension  $V_{bus}$  du bus CC. Le principe de la commande du convertisseur bidirectionnel est illustré dans schéma la figure (V.65).

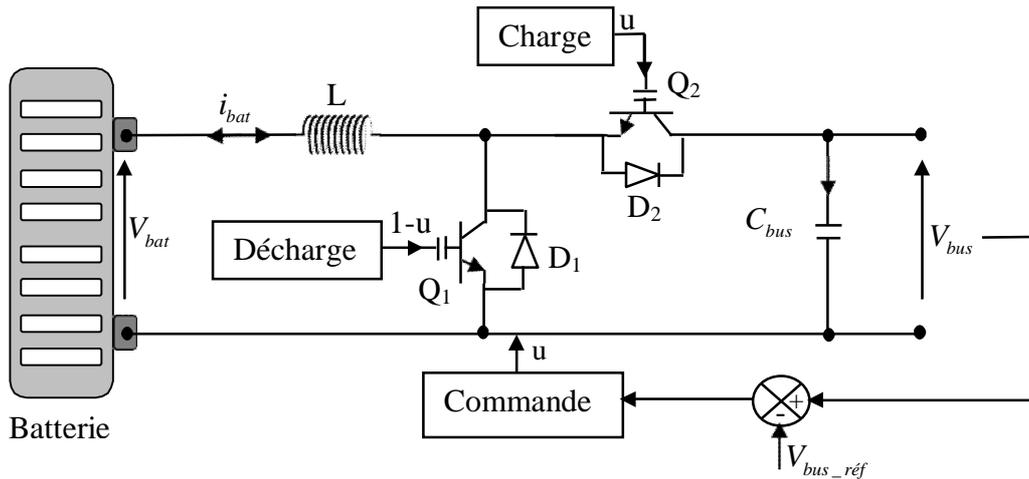


Figure V.65 : Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel.

### V.6.3. Mode de fonctionnement du convertisseur bidirectionnel

Le convertisseur bidirectionnel joue le rôle d'interface entre la batterie et le bus à CC, il admet deux modes de fonctionnements : charger et décharger la batterie.

#### V.6.3.1. Mode charge

Pour le mode charge, le modèle du convertisseur dépend de l'état de l'interrupteur Q2. En effet, avec l'interrupteur Q2 et la diode D1, on retrouve la dynamique d'un convertisseur abaisseur (buck).

#### V.6.3.2. Mode décharge

Pour la décharge, le modèle du convertisseur dépend de l'état de l'interrupteur Q1. Dans ce cas, l'état de l'interrupteur Q1 ainsi que la diode D2 permet d'avoir la dynamique d'un convertisseur élévateur (boost).

Le mode de fonctionnement du convertisseur (charge ou décharge) est régi par le sens du courant. En effet, pour le mode charge, le courant de la batterie est considéré positif alors que pour le mode de décharge il est négatif. Le tableau (V.6) résume le fonctionnement du convertisseur bidirectionnel.

	Commande	Q1	D1
<b>Mode charge (<math>i_{bat} &gt; 0</math>)</b>	$u_1 = 1, u_2 = 0$	ON	OFF
	$u_1 = 0, u_2 = 0$	OFF	ON
	Commande	Q2	D2
<b>Mode décharge (<math>i_{bat} &lt; 0</math>)</b>	$u_1 = 0, u_2 = 1$	ON	OFF
	$u_1 = 0, u_2 = 0$	OFF	ON

Tableau V.6 : Fonctionnement du convertisseur bidirectionnel pour les différents modes.



La figure V.66 illustre le rôle de cet algorithme qui se situe au cœur du système hybride, L'objectif principal de la stratégie de gestion proposée dans cette thèse est de générer des références de puissance pour les sources (éolien, photovoltaïque, batterie et le générateur diesel) dans le but d'assurer d'une façon optimale, une alimentation sans interruption de la charge alternative. Afin d'assurer cette complémentarité, un système de commutation s'impose. Pour cela nous avons proposé un algorithme pour gérer les flux de puissances entre les différentes sources. Il est à base de règle logique "tout ou rien", avec objectif d'activer ou non les sources selon l'évolution de l'état du système hybride. Ce système est formé par huit commutateurs ( $S_{PV}$ ,  $S_W$ ,  $S_{Bat}$ ,  $S_{ds}$ ,  $S_d$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$ ) qui relie respectivement les sources du système. L'interrupteur  $S_3$  joue le rôle d'un démarreur qui permet de lancer le diesel,  $S_1$  et  $S_5$  convertissent la puissance surplus en batteries,  $S_2$  et  $S_4$  pour ouvrir le passage de l'énergie compensée.

### V.7.1. Principe de fonctionnement

L'objectif de l'algorithme de gestion est en fait, de déterminer les points de fonctionnement des sources du système hybride, dans le but de produire autant de puissance que celle demandée par la charge, et cela en sollicitant en priorité les sources d'énergie renouvelable et en épargnant les sources d'énergie conventionnelles (générateur diesel, batteries).

Le PV et l'éolien alimentent la charge du consommateur. S'il ya un déficit, la charge fait appel au système de batterie pour combler ce déficit d'énergie. Si l'énergie totale produite par le PV et l'éolienne avec celle stockée dans la batterie ne satisfait pas la charge, à ce moment-là le groupe électrogène intervient pour combler le déficit. Son arrêt et son démarrage sont conditionnés respectivement par le seuil maximal et le seuil minimal de la batterie.

Une autre tâche que l'algorithme de gestion doit remplir consiste à exploiter d'une façon optimale la batterie de stockage dans le but de rallonger sa durée de vie. Nous avons donc utilisé un système de supervision qui dépend de la condition de l'état de charge (SOC) où les batteries ne sont pas autorisées à dépasser l'état maximal de charge (SOC=100%) et l'état profond de décharge (SOC=30%). Pour réaliser la supervision et la gestion d'énergie, nous avons proposé un algorithme appelé algorithme de supervision et de gestion d'énergie, capable d'atteindre les points suivants:

- ✓ Éviter les décharges profondes des batteries.
- ✓ Éviter les surcharges de batteries.

- ✓ Assurer l'alimentation continue de l'installation en engageant le diesel.
- ✓ Calculer le temps de démarrage du diesel en respectant son temps de réponse et l'état de charge des batteries.

### V.7.2. Le rôle de stockage dans une installation hybride PV/Diesel

L'utilisation des batteries dans les installations hybrides vise à répondre à quatre problématiques principales [138]:

- La récupération de la production d'énergie surplus par rapport à la demande du moment ;
- La fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance ;
- La fourniture d'énergie pour aplanir le pic de la demande ;
- La fourniture d'énergie en cas de défaillance du diesel.

### V.7.3. Modélisation du système de stockage

L'expression de charge-décharge de la batterie plomb-acide est donnée par l'expression suivante [139], [140], [141], [142]:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \left( P_{Tot}(t) - \frac{P_{Ch}(t)}{\eta_{Ond}} \right) \frac{\eta_{BAT}}{V_{Bus}} \Delta t \quad (V.46)$$

La puissance totale est la puissance produite par les deux générateurs PV et éolien

$$P_{Tot}(t) = P_{Pv}(t) + P_{Eol}(t) \quad (V.47)$$

Où :

$P_{Pv}(t)$  et  $P_{Eol}(t)$  : sont respectivement la puissance produite par le générateur photovoltaïque et l'aérogénérateur, après le passage dans l'onduleur.

$P_{Ch}(t)$  : Puissance demandée par la charge pendant un instant  $t$ ;

$\eta_{Bat}$  : Rendement de charge-décharge de la batterie, égal à 1 pendant la charge et égale à 0.8 pendant la décharge.

$\Delta t$  : Pas de simulation;

### V.8. Scénario stratégie de supervision et gestion d'énergie

La puissance du système  $P_{tot}$  à travers l'onduleur est mesurée par :

$$P_{RE}(t) = \eta_{Ond} \times P_{tot}(t) \quad (V.48)$$

Où :

$P_{RE}(t)$  : La puissance renouvelable.

$\eta_{Ond}$  : Rendement de l'onduleur.

Le principe de scénarios charge /décharge des batteries est dépendent de l'état des  $P_{RE}(t)$ ,  $SOC_{Min}(30\%)$ ,  $SOC_{Max}(100\%)$  et de la demande de puissance de la charge à l'heure  $t$  ( $P_{Ch}(t)$ ).

1. Si la valeur  $P_{RE}(t) > P_{Ch}(t)$  et  $SOC(t) < 30\%$  : fermer  $S_1$  et la puissance  $P_{Surplus}(t)$  restante sera utilisée en continu pour charger les batteries :

$$P_{BAT}(t) = P_{Tot} - \frac{P_{Ch}(t)}{\eta_{Ond}} \quad (V.49)$$

- 1.1. Si la valeur de  $P_{RE}(t) > P_{Ch}(t)$  et  $30\% \leq SOC(t) \leq 100\%$  : ouvrir  $S_1$  c.-à-d. débranchez les batteries.

- 1.2. Si la valeur de  $P_{RE}(t) = P_{Ch}(t)$  donc  $P_{Surplus}(t) = 0$  et  $(S_1, S_2)$  reste ouvert.

2.  $P_{RE}(t) < P_{Ch}(t)$  La puissance restante sera fournie par le diesel et/ou les batteries selon la stratégie de répartition suivante:

- 2.1. Si les batteries sont capables de compenser le manque d'énergie ( $30\% \leq SOC(t) \leq 100\%$ ) l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie ferme  $S_{Bat}$ , et ouvre  $S_d$  et  $S_{Ds}$ . Dans ce cas, la puissance des batteries peut être déterminée à partir de l'équation suivante:

$$P_{BAT}(t) = \frac{P_{Ch}(t)}{\eta_{Ond}} - P_{Tot}(t) \quad (V.50)$$

- 2.2. Si l'état de charge des batteries est  $SOC(t) < 30\%$ , l'algorithme de supervision et gestion d'énergie donne un ordre de ferme  $S_{Bat}$  et  $S_d$  (Temporisation  $t=1$ min) puis si  $P_{Ds}(t) \geq P_{Ch}(t)$  et  $SOC(t) < 30\%$  fermer  $S_{Ds}$  pour démarrer le diesel.

$$P_{Ds}(t) = \frac{P_{Ch}(t)}{\eta_{Ond}} - P_{Tot}(t) \quad (V.51)$$

Le but d'utilisation du diesel est d'alimenter la charge et de charger les batteries en même temps ( $S_3$  est fermé si  $P_{Ds}(t) > P_{Ch}(t)$  et  $SOC(t) < 100\%$ ).

$$P_{BAT}(t) = P_{Ds}(t) - \frac{P_{Ch}(t)}{\eta_{Ond}} \quad (V.52)$$

La figure V.67 montre l'organigramme de l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie.

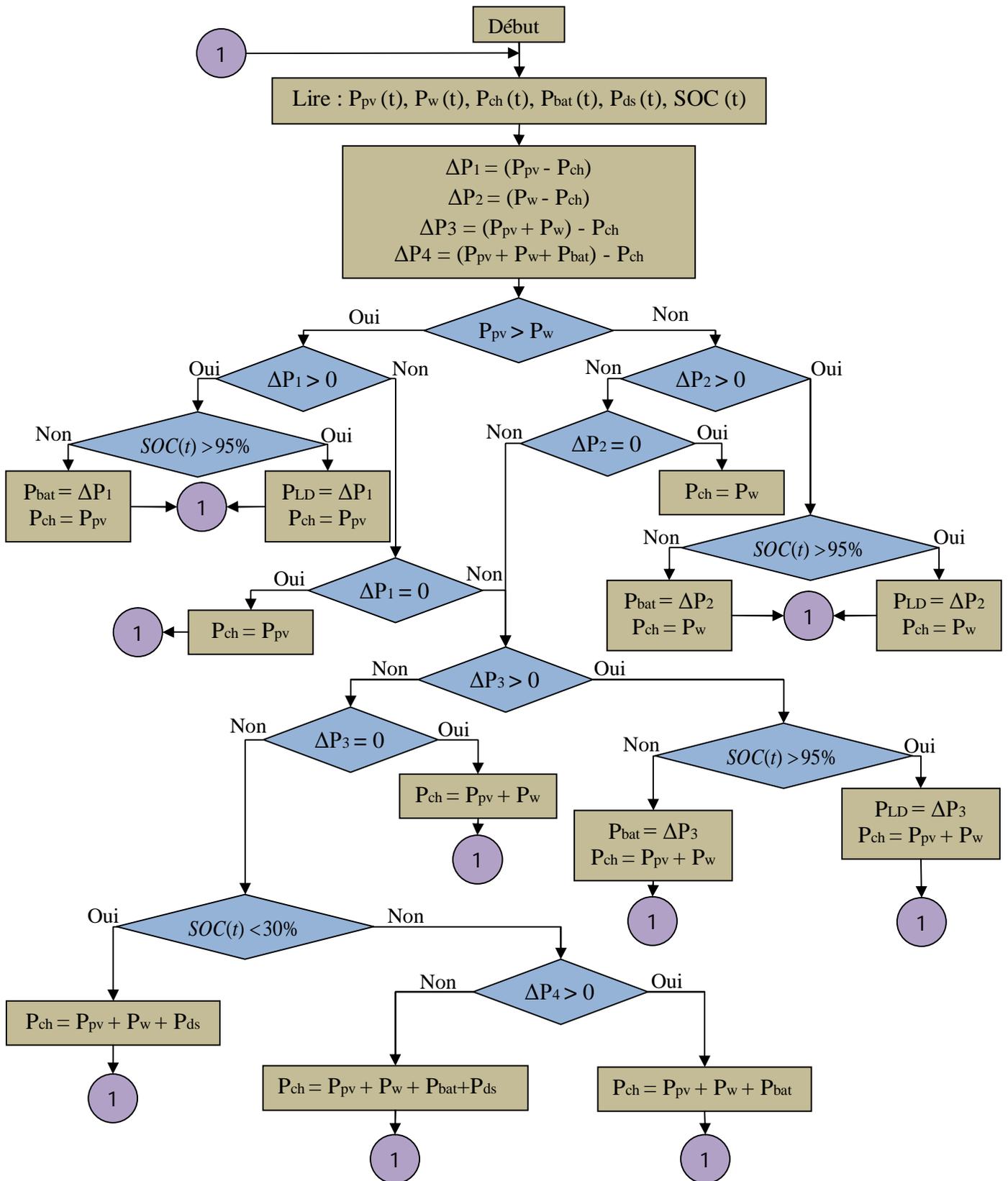


Figure V.67 : Organigramme de l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie photovoltaïque-éolienne-batteries-diesel

Les différentes puissances sont désignées comme suit :

$P_w$  : La puissance éolienne.  $P_{pv}$  : La puissance photovoltaïque.

$P_{ch}$  : La puissance demandée par la charge.

SoC : L'état de charge et de décharge de la batterie (State of charge).

$\Delta P_1$  : La différence entre la puissance photovoltaïque et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :  $\Delta P_1 = P_{pv} - P_{ch}$

$\Delta P_2$  : La différence entre la puissance éolienne et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :  $\Delta P_2 = P_w - P_{ch}$

$\Delta P_3$  : La différence entre la somme des deux puissances, à savoir l'éolienne et la photovoltaïque et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :  $\Delta P_3 = (P_{pv} + P_w) - P_{ch}$

$\Delta P_4$  : La différence entre la somme des trois puissances, à savoir l'éolienne, la batterie ainsi que la puissance photovoltaïque et la puissance demandée par la charge, elle est donnée par l'équation suivante :  $\Delta P_4 = (P_w + P_{pv} + P_{bat}) - P_{ch}$

A travers l'organigramme de supervision et de gestion d'énergie photovoltaïque éolienne batteries-diesel nous pouvons résumer tous les cas de commande des interrupteurs ( $S_{pv}$ ,  $S_w$ ,  $S_{bat}$ ,  $S_{ds}$ ,  $S_d$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$ ) dans le tableau suivant.

	Interrupteurs								Etat de charge des batteries	Puissances
	$S_{pv}$	$S_w$	$S_{ds}$	$S_{bat}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_d$	SOC(%)	$P_{pv}, P_w, P_{ch}, P_{ds}$
<b>Cas 1</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	$SOC > 95\%$	$\Delta P_1 > 0$
<b>Cas 2</b>	1	0	0	0	1	0	0	0	$SOC \leq 95\%$	$\Delta P_1 > 0$
<b>Cas 3</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	$SOC \leq 95\%$	$\Delta P_1 = 0$
<b>Cas 4</b>	0	1	0	0	0	0	0	0	$SOC > 95\%$	$\Delta P_2 > 0$
<b>Cas 5</b>	0	1	0	0	0	1	0	0	$SOC \leq 95\%$	$\Delta P_2 > 0$
<b>Cas 6</b>	0	1	0	0	0	0	0	0	$SOC < 30\%$	$\Delta P_2 = 0$
<b>Cas 7</b>	1	1	0	0	0	0	0	0	$SOC > 95\%$	$\Delta P_3 > 0$
<b>Cas 8</b>	1	1	0	0	1	1	0	0	$SOC \leq 95\%$	$\Delta P_3 > 0$
<b>Cas 9</b>	1	1	1	0	0	0	1	1	$SOC < 30\%$	$\Delta P_3 = 0$
<b>Cas 10</b>	1	1	0	1	0	0	0	0	$SOC > 30\%$	$\Delta P_4 > 0$
<b>Cas 11</b>	1	1	1	0	0	0	1	1	$SOC > 30\%$	$\Delta P_4 \leq 0$

Tableau V.7 : La commande des interrupteurs.

## V.9. Résultats de simulation et discussion

Pour l'installation étudiée, l'environnement Matlab permet la représentation graphique des résultats, il fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants et de l'ensemble de l'installation étudiée (la fraction de l'énergie renouvelable, l'énergie totale produite et la consommation, l'excès ...).

La satisfaction permanente de la charge est assurée par le générateur photovoltaïque, le générateur éolien, le générateur diesel (Ds) et les batteries. Le fonctionnement du diesel dépend exclusivement de l'état de charge/décharge des batteries. Ainsi, afin de contrôler le fonctionnement (marche/arrêt) du diesel, deux seuils ( $SOC_{max}$  et  $SOC_{min}$ ) sont définis. Celui-ci permet de connaître toutes les puissances fournies par les générateurs, l'état de charge des batteries (SOC) à chaque pas d'échantillonnage pendant la journée. Notre système est simulé à deux scénarios par différents tests avec un profil de charge variable dans des conditions climatique fixe puis avec un profil de charge variable dans de conditions climatique variable.

### V.9. 1. Scénarios 1 : Profil de charge variable et condition climatique fixe

Pour qu'on puisse extraire les paramètres du GPV et éolien, on le fait fonctionner dans les conditions standard de fonctionnement ( $T = 25^{\circ}C$ ,  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $V = 10 \text{ m/s}$ ). la puissance électrique produite par le système photovoltaïque  $P_{pv} = 7500 \text{ W}$  et système éolien  $P_w = 7500 \text{ W}$  voir figure suivant.

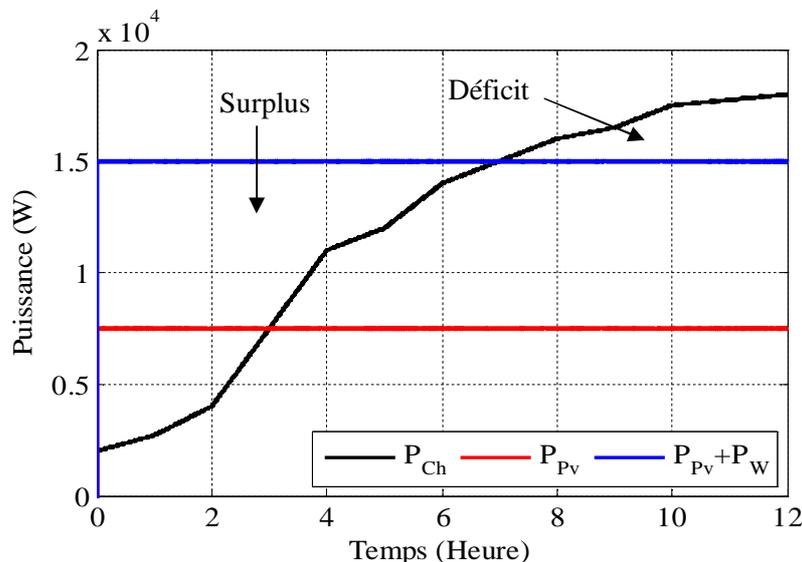


Figure V.68 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien et puissance de charge.

**a. Alimenter la charge par système photovoltaïque + éolien**

D'après la figure (V.69) nous pouvons dire que le système photovoltaïque et éolien de  $t=0$  jusqu'à  $t=t_1$  est en mesure de répondre à la demande de la charge et peut fournir un surplus d'énergie, mais de  $t>t_0$ , le système n'a pas pu fournir l'énergie nécessaire pour satisfaire la charge (Déficit).  $t=0$  jusqu'à  $t=t_0$  générateur PV cabale alimenter la charge donc fermer  $S_{PV}$ , nous remarquons entre la période  $[t=t_0, t=t_1]$  que le système photovoltaïque est incapable de répondre au besoin d'énergie donc l'algorithme de supervision et de gestion fermé  $S_1$  et ferme  $S_w$  pour compenser le manque d'énergie à l'aide éolien.

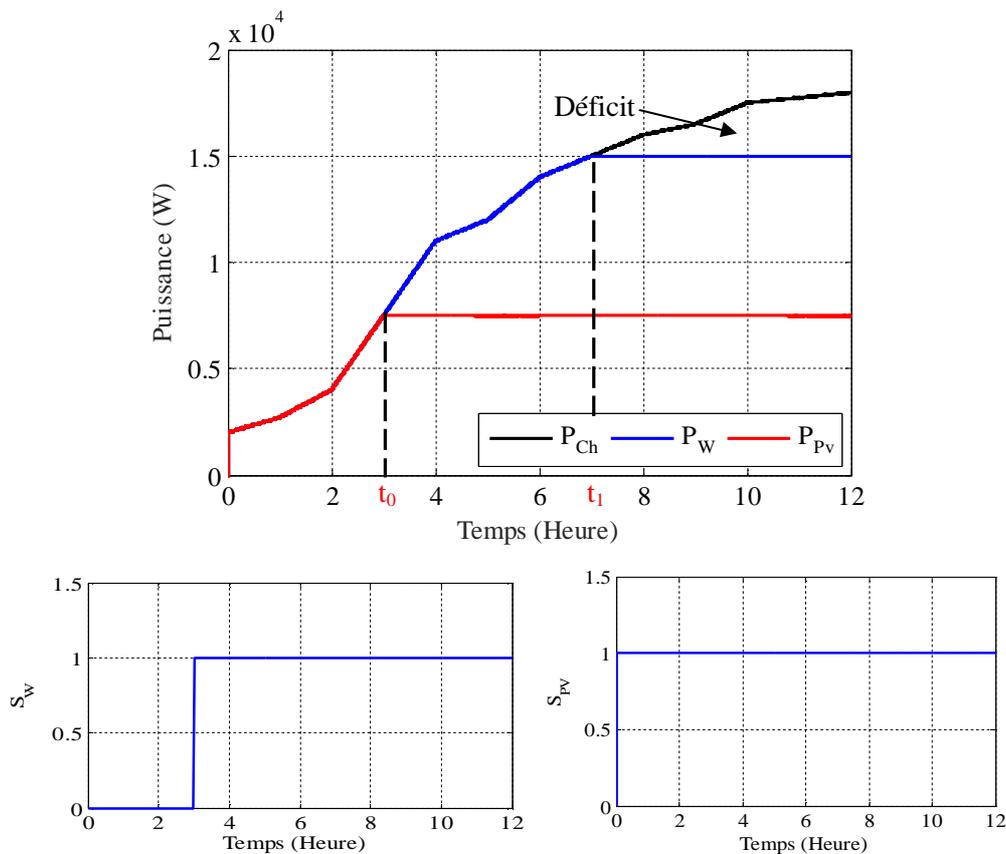


Figure V.69 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien et signaux de commande des interrupteurs

**b. Alimenter la charge par système photovoltaïque + éolien avec système de stockage**

Les courbes des puissances de PV, éolien et des batteries sont représentées par la figure (V.70). Elle montre que la puissance fournie par les batteries compense le besoin d'énergie entre la période  $t_0$  et  $t_1$ .

D'après la figure (V.71) le système hybride alimente la charge par le système (photovoltaïque éolien) de  $t=0$  jusqu'à  $t=t_1$ , dans ce cas ( $S_1=1, S_2=1$ ) et les batteries continuent

à stocker l'énergie surplus jusqu'à  $t=t_1$ , après à  $t=t_1$  la puissance (photovoltaïque, éolien) est inférieure à celle demandée par la charge donc ( $S_{Bat}=1$ ) et les batteries commencent à fournir l'énergie jusqu'à la décharge profonde ( $t=t_2$ ). A  $t>t_2$  nous remarquons que le SOC < 30% donc ( $S_{Bat}=0$ ) et en ce moment la charge n'est pas satisfaite.

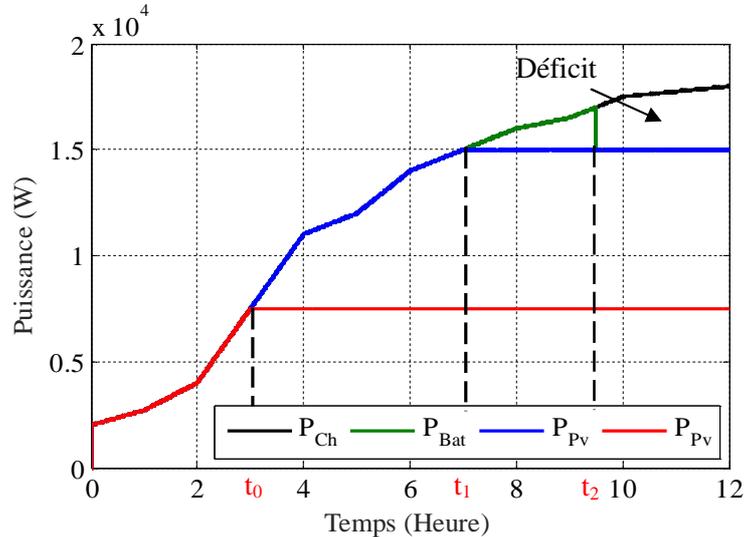
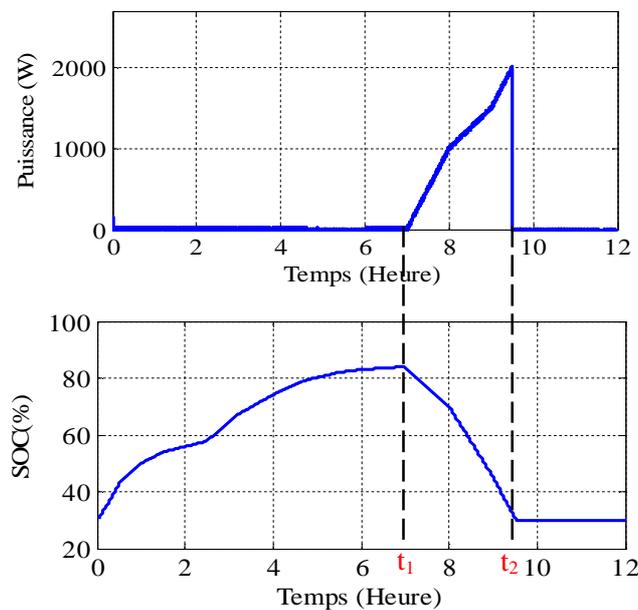


Figure V.70 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie.

Entre la période de temps  $t=0$  et  $t=t_1$  nous observons que l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie a fermé les interrupteurs ( $S_1, S_2$ ) afin de permettre le transfert de l'énergie surplus vers les batteries, l'état de charge des batteries (SOC) augmente progressivement jusqu'à il atteigne un niveau (SOC=85%). Avec l'augmentation continue de la charge, nous remarquons entre la période  $t=t_1, t=t_2$  que le système photovoltaïque est incapable de répondre au besoin d'énergie donc l'algorithme de supervision et de gestion ouvre ( $S_1, S_2$ ) et ferme  $S_{Bat}$  pour compenser le manque d'énergie à l'aide des batteries.



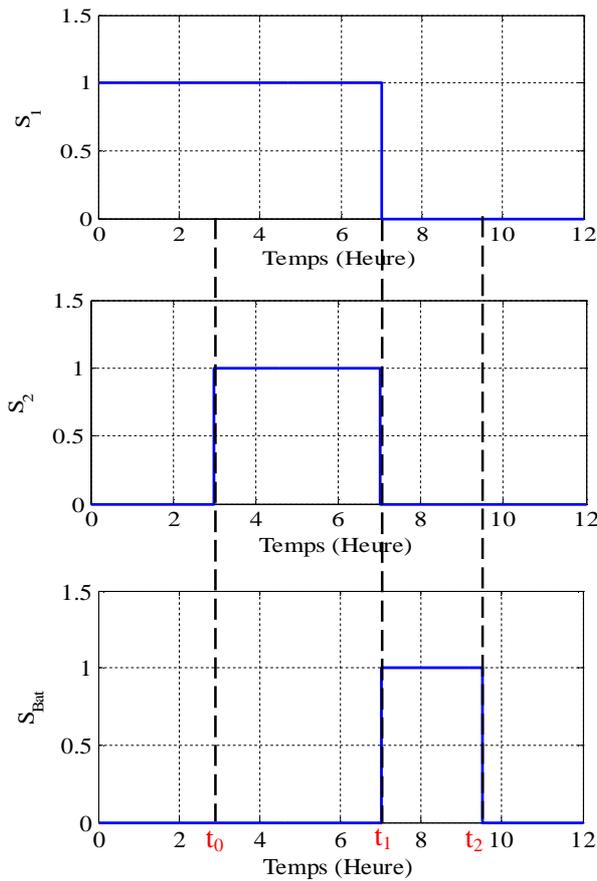


Figure V.71 : Comportement des batteries et signaux de commande des interrupteurs.

**c. Alimenter la charge par système photovoltaïque + éolien avec système de stockage et diesel**

La figure (V.72) montre la bonne gestion de l'algorithme ASGE pour gérer le système hybride selon la priorité d'alimentation en énergie. À partir des résultats de simulation de système PV-éolien-Diesel avec un système de stockage (batteries), il est facile de conclure que le fonctionnement du système de stockage permet de réduire l'état « On » du diesel.

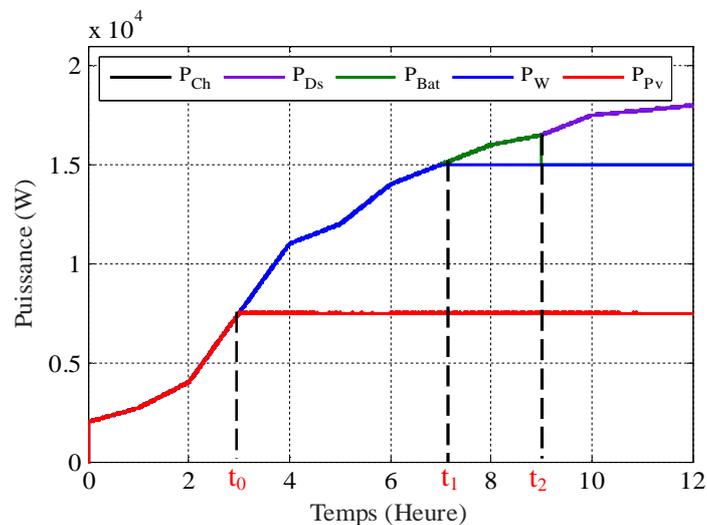


Figure V.72 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie-Diesel.

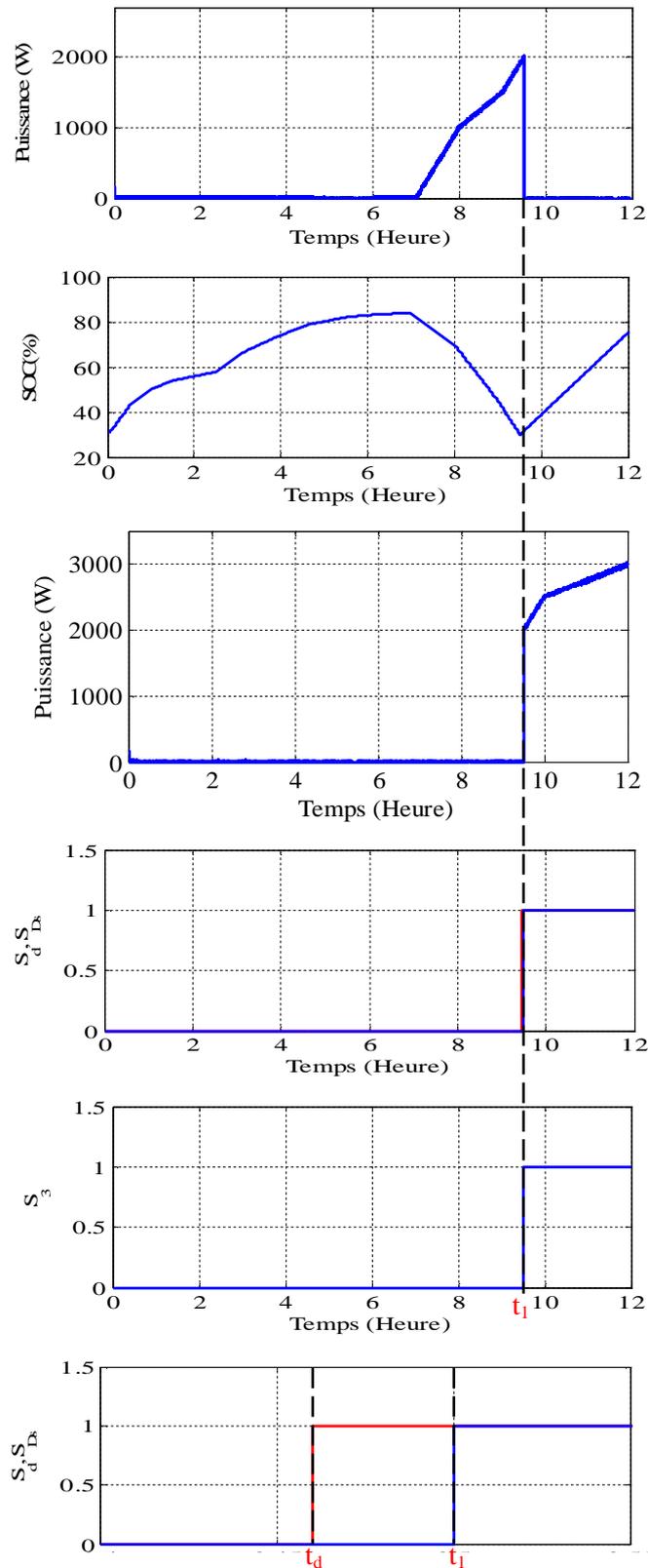


Figure V.73 : L'état On/Off du diesel et signaux de commande des interrupteurs.

La figure (V. 73) montre que l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie ferme  $S_3$  entre la période  $t=t_d$  et  $t= t_1$  pour mettre le démarreur du diesel en état « On » avant que les batteries n'atteignent le profond de décharge (SOC=30%).

Lorsque les batteries atteignent le profond de décharge et système (photovoltaïque éolien) incapable alimentée la charge donc fermée  $S_{Ds}$  est fermé entre  $t=t_1$  et  $t=12h$  pour permettre le rôle du diesel à répondre au besoin d'énergie et  $S_3=1$  pour transférer l'énergie surplus fournie par le diesel aux batteries, à ce moment l'état de charge des batteries (SOC) commence à augmenter progressivement jusqu'au niveau maximal 100%.

### V.9. 2. Scénarios 2: Profil de charge variable et condition climatique variable

La figure (V.74) montre l'évolution de la puissance électrique produite par le système photovoltaïque  $P_{Pv}$ , système éolien  $P_W$  et la consigne puissance demandée par la charge  $P_{Ch}$ .

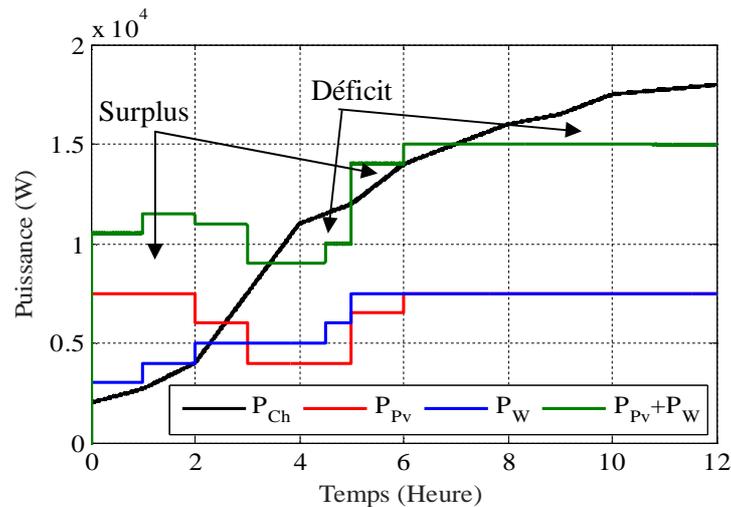


Figure V.74 : Puissance électrique produite par le système PV et par éolien.

#### a. Alimenter la charge par système photovoltaïque + éolien sans système de stockage

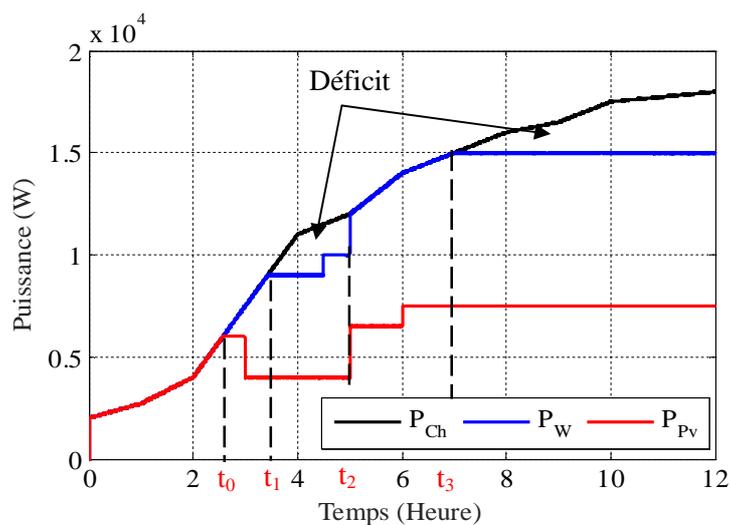


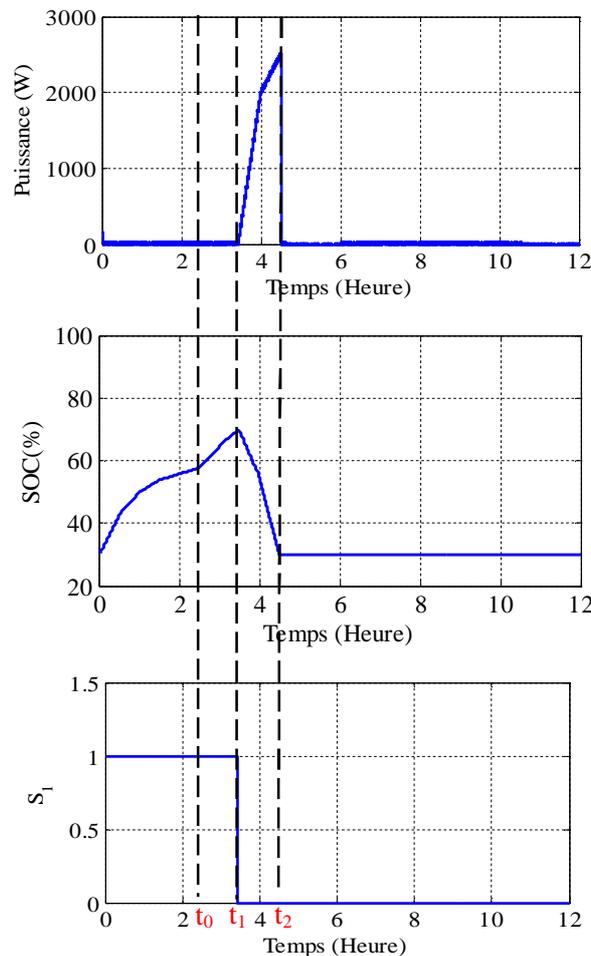
Figure V.75 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien.

D'après la figure (V.75) montre que dans la période  $[t=0, t=t_1]$  et la période  $[t=t_2, t=t_3]$  il y a un surplus d'énergie, le système (photovoltaïque +éolien) est donc capable d'alimenter la

charge, mais dans la période  $[t=t_1, t=t_2]$  et la période  $[t=t_3, t=12]$  nous constatons qu'il y a un déficit d'énergie et cela est dû au changement climatique, donc le système (photovoltaïque +éolien) est incapable d'alimenter la charge.

**b. Alimenter la charge par système photovoltaïque + éolien avec système de stockage**

Les figures (V.76 et V.77) montrent le fonctionnement de l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie dans le système photovoltaïque – éolien - batteries lorsque la charge est variable et le climat change rapidement. On remarque à travers la figure V.43 que l'état de SOC augmente progressivement entre la période de temps  $[t = 0, t= t_1]$  donc  $S_1=1$ , et  $[t = t_0, t= t_1]$   $S_2=1$  ce qui signifie que les batteries sont chargées à l'aide de la puissance surplus du PV-éolien. Dans la période entre  $[t = t_1 et t= t_3]$  le système (PV-éolien) incapable alimenté la charge donc compensé par la batterie  $S_{Bat}=1$  et  $S_1=S_2=0$ , Dans la période entre  $t = t_2 et t = t_3$ , nous remarquons que l'état SOC reste constant à 30%, et  $(S_{PV}=0, S_w=0, S_{Bat}=0)$  ce qui signifie que les batteries ne sont pas chargées ou déchargées et ce qui montre que le système PV-éolien est toujours incapable de fournir le surplus ou le besoin de l'électricité à, cause du changement climatique.



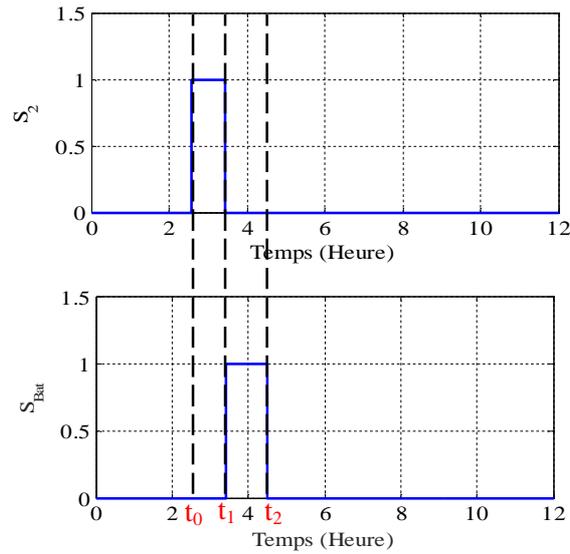


Figure V.76 : Comportement des batteries et signaux de commande des interrupteurs.

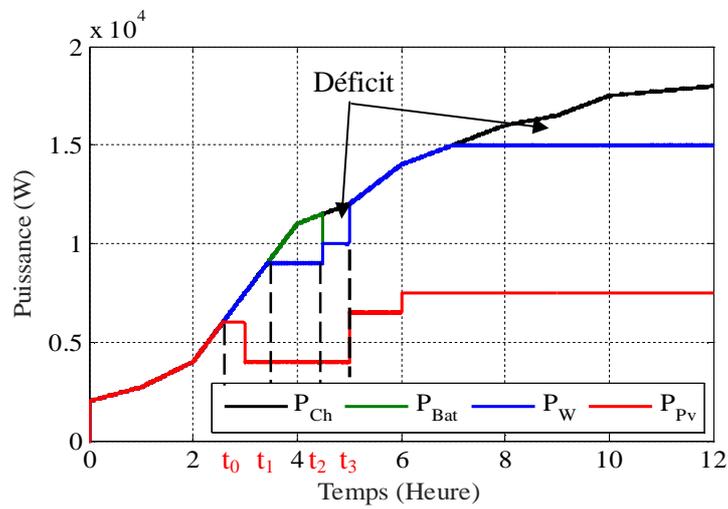


Figure V.77 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie.

**c. Alimenter la charge par système photovoltaïque + éolien avec diesel secoure**

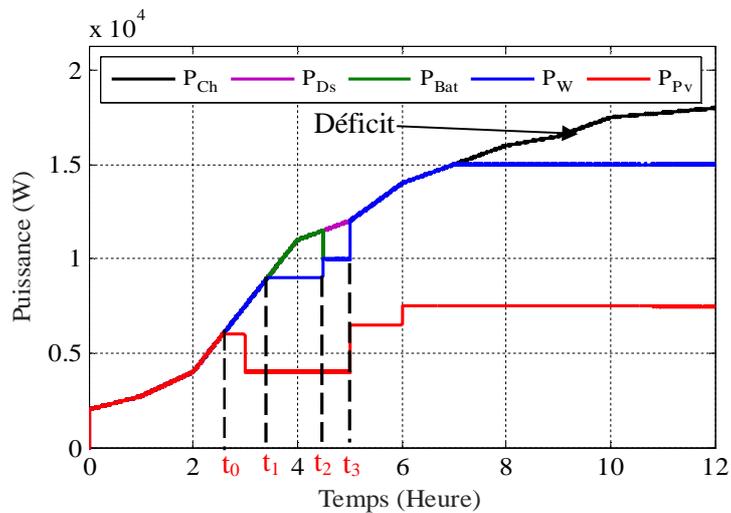


Figure V.78 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie-Diesel.

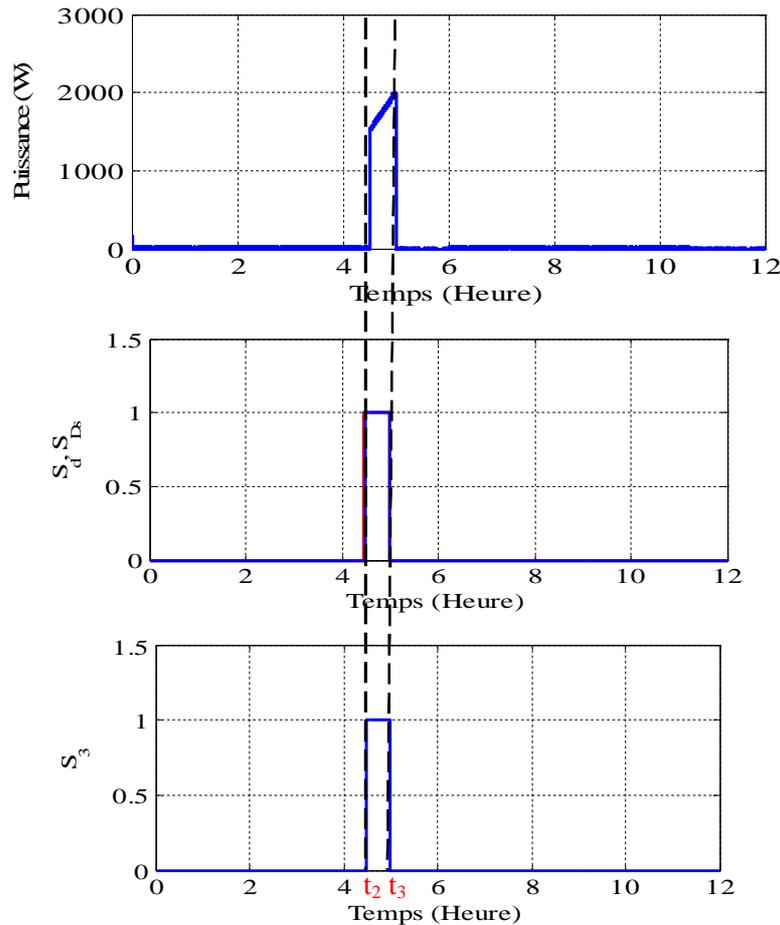


Figure V.79 : L'état On/Off du diesel et signaux de commande des interrupteurs.

D'après les figures (V.78 et V.79) les batteries atteignent le profond de décharge, donc l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie ferme  $S_3$  entre la période  $t=t_d$  et  $t= t_2$  pour mettre le démarreur du diesel en état « On » avant que les batteries n'atteignent le profond de décharge (SOC=30%).  $S_4$  est fermé entre  $t=t_1$  jusqu'à système (PV+ éolien) capable alimenté la charge et pour permettre le rôle du diesel à répondre au besoin d'énergie, fermée  $S_5=1$  pour transférer l'énergie surplus fournie par le diesel aux batteries, à ce moment l'état de charge des batteries (SOC) commence à augmenter progressivement jusqu'au niveau maximal 100%.

D'après les figures (V.78 et V.80) nous remarquons entre la période  $t=t_4$ ,  $t=12$  que le système photovoltaïque – éolien est incapable de répondre au besoin d'énergie et l'état de charge des batteries (SOC=70%) donc l'algorithme de supervision et de gestion ouvre ( $S_1$ ,  $S_2$ ) et ferme  $S_{Bat}$  pour compenser le manque d'énergie à l'aide des batteries.

Les courbes de puissance de PV-éolien et des batteries sont représentées par la figure V.81. Elle montre que la puissance fournie par les batteries compense le besoin d'énergie entre la période  $t=t_4$  et  $t=t_5$ .

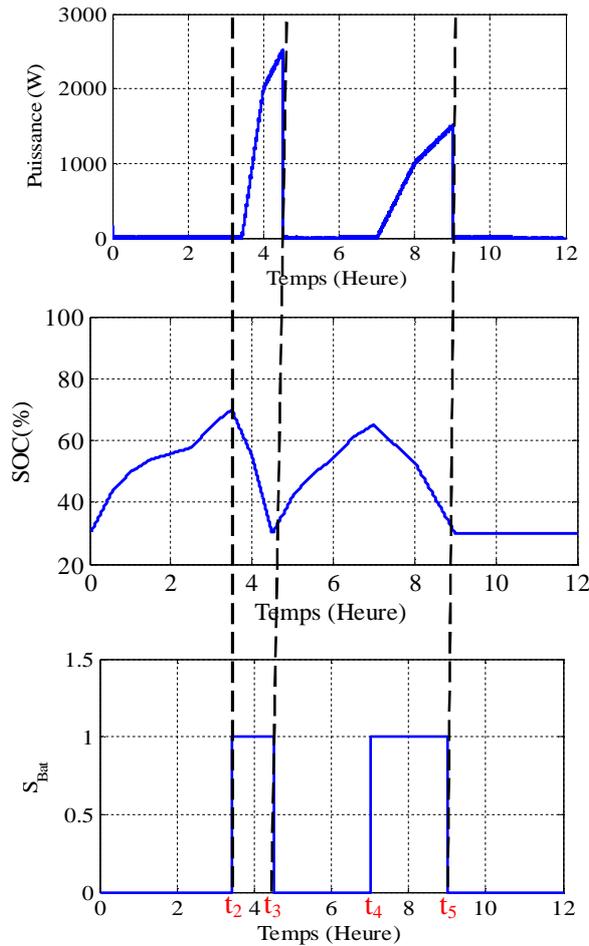


Figure V.80 : Comportement des batteries et signaux de commande des interrupteurs.

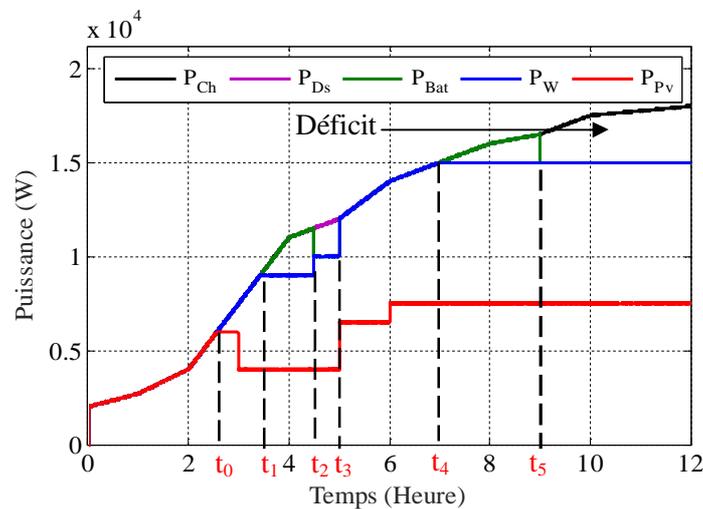


Figure IV.81 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie-Diesel.

D'après les figures (V.81 et V.82) nous remarquons entre la période  $t=t_5$ ,  $t=12$  que l'état de charge des batteries ( $SOC=30\%$ ) et le système photovoltaïque – éolien est incapable de répondre au besoin d'énergie et donc l'algorithme de supervision et de gestion ouvre  $S_{Bat}$  et ferme ( $S_d$ ,  $S_{Ds}$ ) pour compenser le manque d'énergie à l'aide de diesel, et donne l'ordre de fermer  $S_3$  pour transférer l'énergie surplus fournie par le diesel aux batteries,

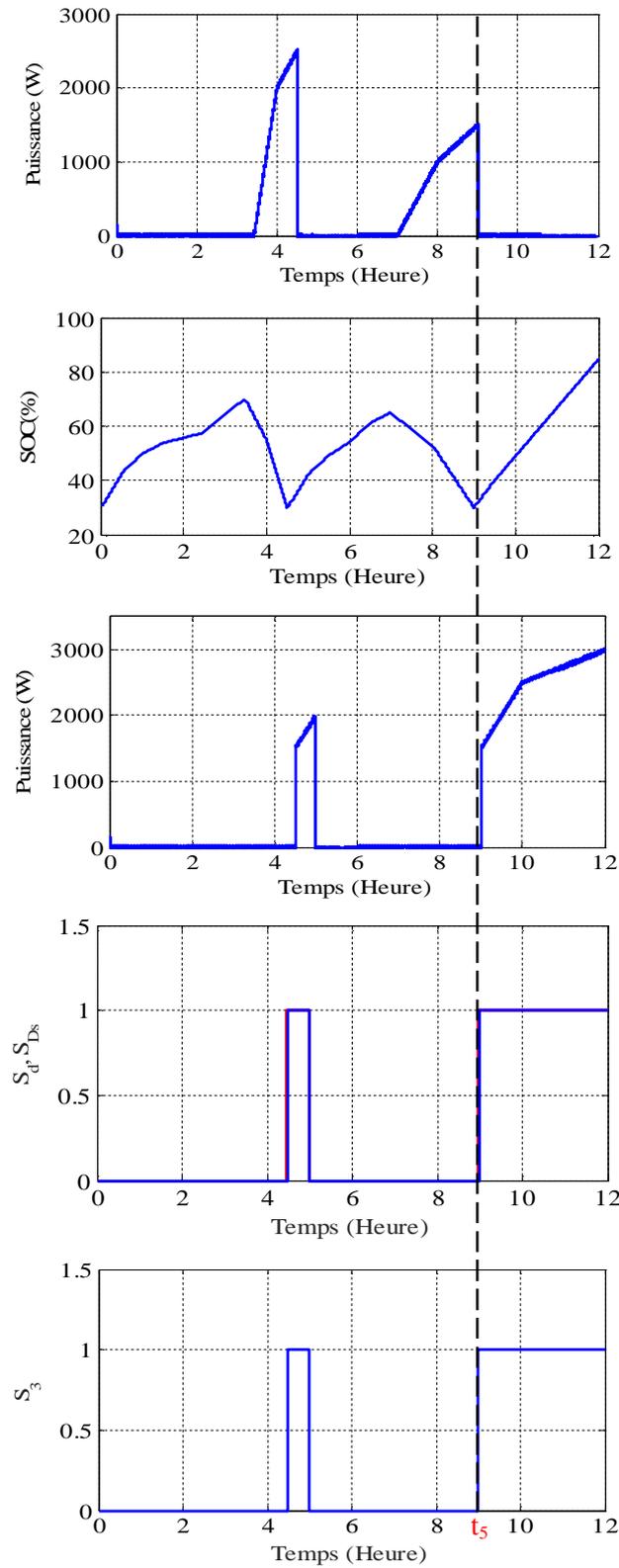


Figure V.82 : L'état On/Off du diesel et signaux de commande des interrupteurs.

La figure (V.83) montre que le système hybride par l'algorithme de supervision et de gestion d'énergie est capable de fournir une alimentation sans interruption à la charge.

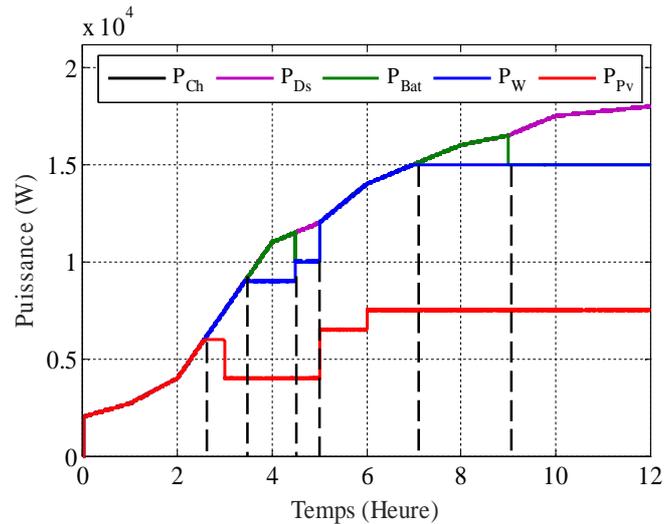


Figure V.83 : Puissance électrique produite par le système PV-Eolien-Batterie-Diesel.

## V.10. Conclusion

Dans ce chapitre, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les systèmes hybrides ont été données, ainsi que les différents types d'architectures existants, les outils dimensionnement des systèmes hybrides composés d'un champ PV, éoliennes et le système de stockage d'énergie, une attention particulière a été consacrée à ce type sources et au stockage. Egalement les problèmes et les stratégies de commande habituelles de ce genre de systèmes ont été présentés.

Nous avons présenté un système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage. Nous avons ainsi donné dans un premier temps une présentation du système global. Ensuite, nous avons dimensionné les trois sources d'énergie. Puis nous les avons connecté vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge.

Nous avons utilisé un bus continu qui reçoit l'énergie produite par les sources photovoltaïque et éolienne puis livrée au consommateur à l'aide d'un onduleur. Un des avantages de cette structure est l'utilisation des batteries nécessaires en cas de besoin pour compenser un éventuel manque de puissance. Mais puisque le système photovoltaïque-batteries à certains moments de la journée, ne fournissait pas l'énergie nécessaire à la charge (déficit), Il était nécessaire d'ajouter un générateur diesel au système, mais avec un temps de marche minimal. Pour avoir un comportement optimale de l'installation d'un point de vue de puissance, nous avons développé *Algorithme de Supervision et Gestion d'Energie (ASGE)* ce qui permet une gestion efficace et rationnelle de l'énergie pour satisfaire les besoins du consommateur. Plusieurs résultats de simulation ont été présentés ont illustré les performances de notre installation en présence de changements climatiques et de variations de la consommation d'énergie.

---

---

# **Conclusion Générale**

---

---

## **Conclusion Générale**

Le but du travail présenté dans ce mémoire, est la contribution à l'étude, la modélisation et la simulation de systèmes hybride de production d'électricité autonome, à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne), En absence du soleil et du vent, nous avons prévu un générateur diesel et des batteries de stockage pour l'alimentation de secours pour assurer l'alimentation en l'électricité sans interruption.

Deux objectifs principaux ont été ciblés au début de ce travail : la première porte sur la commande en puissance d'un système éolien à base d'une GADA. Le second objectif concerne l'association à ce système, un générateur photovoltaïque et une unité de stockage d'énergie afin de réaliser un système global d'énergie hybride (éolien /PV/Diesel) capable d'alimenter un récepteur autonome et d'offrir une possibilité pour ces derniers de participer aux services système et contribuer à l'amélioration de la qualité d'énergie.

Dans le deuxième chapitre, les concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique ont été rappelés dans une première partie. Les différentes structures de conversion éolienne utilisant les machines électriques ont été présentées et analysées en termes d'avantages qu'elles procurent. La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en termes de production de puissance élevée, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques.

La seconde partie du chapitre a été consacrée à la modélisation et la commande de la partie mécanique de l'éolienne. Les modèles analytiques des différents organes mécaniques constituant le système éolien ont été établis en adoptant le schéma bloc. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différentielle qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs d'aérodynamique pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de la turbine. Afin de commander le système éolien, deux stratégies de contrôle ont été détaillées. La stratégie MPPT permet de fournir un maximum de puissance active produite au réseau électrique grâce au fonctionnement à vitesse variable de la GADA. Puis, dans notre travail on a réalisé le bloc MPPT par deux régulateurs (PI classique et flou) dont l'objectif était d'analyser leurs performances en termes de poursuite. Les résultats obtenus de la stratégie MPPT ont montrés que les deux régulateurs donnent presque

des résultats similaires. Cependant, le régulateur flou s'est montré le plus efficace avec un temps de réponse petit par rapport au PI classique.

La modélisation et la commande de la partie électrique de l'éolienne était l'objet du troisième chapitre. La commande indépendante des puissances active et réactive a été étudiée et deux méthodes, directe et indirecte, ont été proposées. Cette dernière a été retenue dans ce travail pour le contrôle des courants rotoriques et puissances active et réactive statorique de la GADA. Cette stratégie de contrôle a été validée par simulation avec un modèle de la GADA qui prend en compte la résistance statorique. Nous avons établi une comparaison par simulation entre les deux méthodes de commande en termes de ; suivi de consignes, sensibilité aux variations de la vitesse du vent et robustesse vis-à-vis les variations paramétriques.

Le quatrième chapitre est divisé en deux principales parties ; la première a traité le réglage par modes glissants classique d'ordre 1 avec surface de commutation non linéaire. Nous avons présenté le concept général des systèmes à structure variable avec mode de glissement. Puis, nous avons abordé la commande de la GADA par cette technique, pour concevoir des régulateurs de puissances statoriques active et réactive, en synthétisant le réglage selon le modèle réduit non-linéaire obtenu par orientation du flux statorique par le biais des tensions d'alimentation. Dans la seconde partie de ce chapitre, une stratégie de commande par mode glissant flou adaptatif a été proposée afin de répondre aux objectifs définis, donc une commande robuste augmentant alors la fiabilité, améliorant le rendement énergétique, et qui avec le peu de broutement qu'elle engendre, limite le stress mécanique sur l'arbre de transmission. Les résultats de simulations obtenus ont montré l'efficacité et les performances de la commande proposée par rapport aux autres méthodes utilisées (mode glissant et mode glissant flou adaptatif).

Le dernier chapitre a traité le dimensionnement d'un système hybride constitué de systèmes de conversion d'énergie renouvelable, PV, éolien, diesel et le système de stockage afin d'alimenter un récepteur local. Conséquemment nous avons montré l'intérêt bénéfique d'un système hybride par apport au système d'énergie conventionnelle dédié à l'alimentation en énergie électrique des zones isolées autant que le système de stockage, qui est indispensable dans ce type de systèmes de génération d'énergie électrique.

Le thème de recherche traité est un sujet d'actualité et très intéressant dans le domaine des énergies renouvelables surtout avec la connexion au réseau électrique. On peut développer et

continuer ce sujet de recherche dans les futurs travaux à travers quelques perspectives suggéré dont on cite :

- ✓ Etude de l'optimisation d'un système d'énergie hybride (PV/éolien) en ajoutant d'autres sources d'énergie renouvelable telles que (la géothermie, la biomasse, hydraulique, etc...) ou même conventionnelles avec l'intégration d'autres types de systèmes de stockage d'énergie comme (l'hydrogène, électrolyser, supra-condensateur etc...) avec la connexion au réseau électrique ;
- ✓ Intégration d'une charge alternative à l'étude techno-économique ;
- ✓ L'étude du comportement du système hybride face aux éventuels défauts sur le récepteur électrique pour assurer la stabilité et la continuité du service ;
- ✓ L'étude des commandes avancées pour l'implantation des systèmes hybrides afin d'améliorer la qualité d'énergie.

---

---

# **Annexes**

---

---

## Annexe (A)

### A. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

#### A.1. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (A.1) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $\frac{V_1+V_2}{2}$  la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{A.1})$$

La puissance  $P_{aer}$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aer} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{A.2})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (A.1) :

$$P_{aer} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{A.3})$$

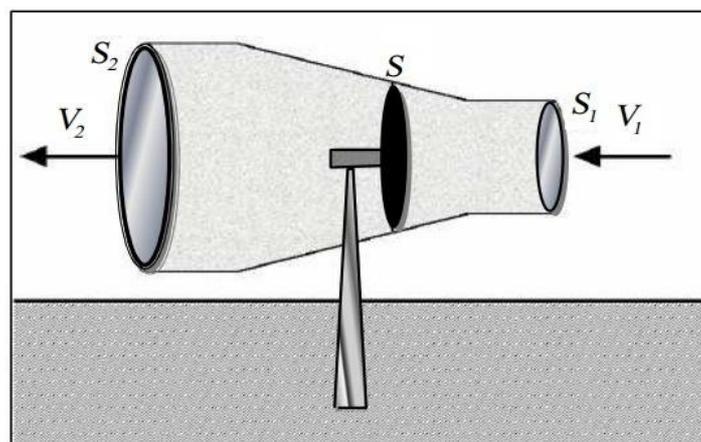


Figure A.1 : Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_v$  correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{A.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{aer}}{P_v} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{A.5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure (A.1)), on s'aperçoit que le ratio  $P_{aer}/P_v$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

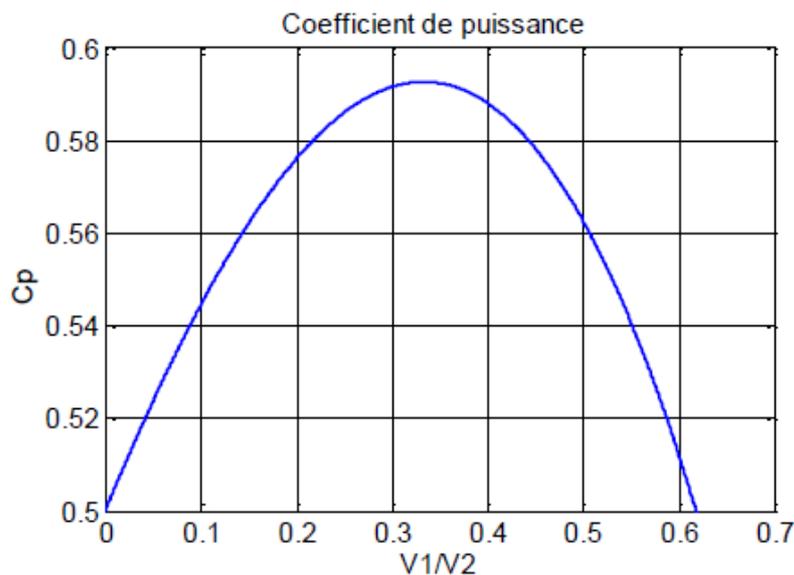


Figure A.2 : Coefficient de puissance.

## A.2. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (A.1), (A.4) et (A.5), la puissance mécanique  $P_{aer}$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aer} = \frac{P_{aer}}{P_v} \cdot P_v = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{A.6})$$

$R$  : rayon de l'aérogénérateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (figure (A.3)).

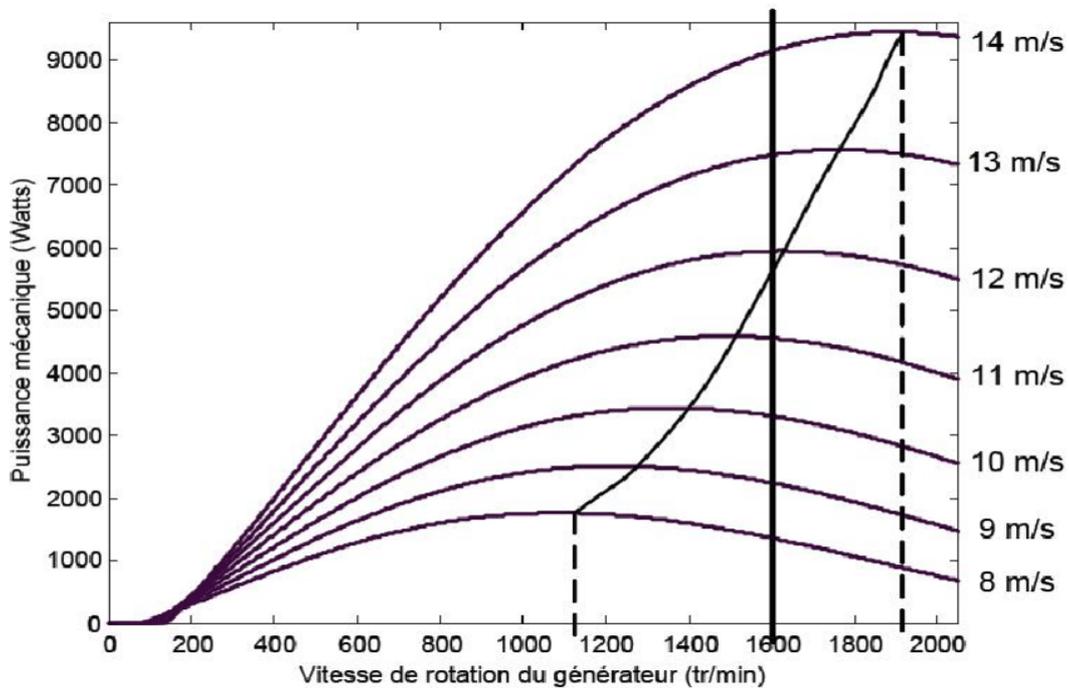


Figure A.3 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la figure (A.3)) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

## Annexe (B)

### B. Réglage de vitesse par régulateur de type PI classique

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse de rotation par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système, un correcteur proportionnel intégral est utilisé. Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique. Cependant le couple peut présenter un dépassement important qui peut nuire au fonctionnement du système, pour palier à ce problème on utilise une limitation de la référence du couple à la sortie du correcteur, la vitesse à régler se définit à

partir de l'équation mécanique, la structure du régulateur de vitesse est montrée sur la figure (II.23).

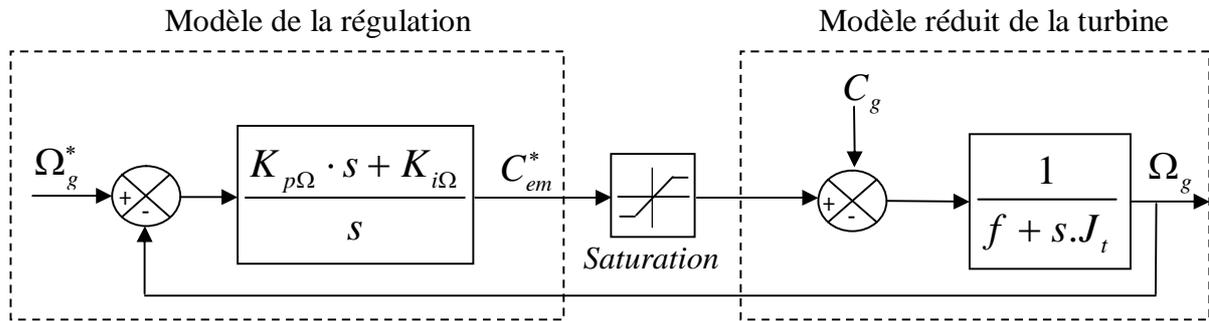


Figure B.1 : Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation.

Nous pouvons écrire la fonction de transfert en boucle fermée sous la forme mathématique suivante :

$$\Omega_g = F(s) \cdot \Omega_g^* + G(s) \cdot C_g \quad (\text{B.1})$$

Où  $F(s)$  est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$F(s) = \frac{K_{p\Omega} \cdot s + K_{i\Omega}}{J \cdot s^2 + (f_v + K_{p\Omega})s + K_{i\Omega}} \quad (\text{B.2})$$

Et  $G(s)$  est la fonction de la perturbation :

$$G(s) = \frac{s}{J \cdot s^2 + (f_v + K_{p\Omega})s + K_{i\Omega}} \quad (\text{B.3})$$

Pour baisser l'effet de la perturbation (couple  $C_{em}$ ), nous avons intérêt à choisir une valeur élevée pour le gain  $K_{p\Omega}$ . L'autre gain est choisi de manière à avoir une fonction de transfert du 2<sup>ème</sup> ordre, ayant une pulsation naturelle et un coefficient d'amortissement, déterminés comme suit :

$$\begin{cases} \omega_{n,1} = \sqrt{\frac{K_{i\Omega}}{J}} \\ \zeta_1 = \frac{f_v + K_{p\Omega}}{J \cdot 2\omega_{n,1}} \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

Donc, pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement, nous trouvons :

$$\begin{cases} K_{i\Omega} = \omega_{n,1}^2 \cdot J \\ K_{p\Omega} = 2\zeta_1 J \omega_{n,1} - f_v \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

## Annexe (C)

### C. Synthèse du régulateur PI

Les besoins pour la commande du système doivent inclure plusieurs facteurs tels que la réponse au signal de commande, la sensibilité au bruit de mesure, le rejet des perturbations. Dans ce contexte, la commande étant découplée et linéarisée, de simples régulateurs PI classiques, avec une action proportionnelle et une autre intégrale, peuvent satisfaire convenablement ses contraintes.

Ce type de régulateur, de conception simple, permet d'éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne grâce à son action intégrale, la rapidité de la régulation est liée à la dynamique désirée par son action proportionnelle. L'action dérivée est écartée, en effet bien que permettant d'anticiper et d'accélérer la régulation, elle est caractérisé par le fait d'amplifier les bruits du système.

Le schéma fonctionnel la figure (C.1) mets en évidence la boucle de régulation utilisée pour le contrôle des puissances actives et réactives, identique sur les deux axes et définie par les paramètres ( $K_p$  et  $K_i$ ).

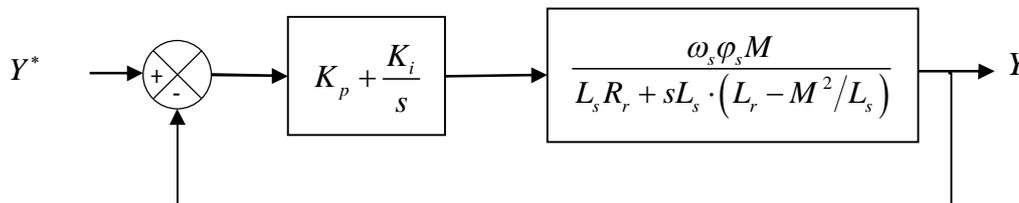


Figure C.1 : Système régulé par un PI.

La figure (C.1) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure (III.19).

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{S + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} \cdot \frac{\frac{\varphi_s \omega_s M}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{S + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (C.1)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (C.2)$$

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{\varphi_s \omega_s M}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{S} \quad (C.3)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r S} \quad (C.4)$$

Avec

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{\varphi_s \omega_s M} \quad (C.5)$$

Avec  $\tau_r$  le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne ou les variations de vent sont rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{\varphi_s \omega_s M}, K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{\varphi_s \omega_s M} \quad (C.6)$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI.

Cette même méthode de synthèse des correcteurs est appliquée pour déterminer les gains des correcteurs des deux types de commandes étudiées.

## *Annexe (D)*

### **D. La logique Floue**

#### **D.1. Principe et définition**

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh en 1965, est une technique pour le traitement de connaissances imprécises et incertaines. Elle permet de prendre en considération des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage naturel, telle que grand, petit, lent, rapide, ...etc.

On présente un exemple simple pour comprendre l'intérêt de la logique floue sur la logique classique.

Exemple : dans la logique classique, une vitesse peut être qualifiée par le terme « faible » ou « élevée ».

Dans la logique floue, des échelons d'appréciations intermédiaires de la variable vitesse sont possibles, la « vitesse » devient une variable linguistique dont les valeurs sont par exemple : « très faible », « faible », « moyenne », « élevée », « très élevée ». Une vitesse de 1000 tr/min par exemple dans la logique classique correspond au seul ensemble moyen, alors que dans le modèle flou, elle appartient à la fois aux ensembles « faible » et « moyenne ».

#### **D.2. Théorie des sous-ensembles flous et logique floue**

Selon George Cantor (1845-1918), un ensemble est défini par ses éléments. En 1965, Lotfi A. Zadeh élaborera une nouvelle théorie .

Il constata que dans le monde qui nous entoure, un ensemble n'a pas de limite nette à partir desquelles on peut dire d'un élément appartient ou non à cette ensemble. Ce fut pour cette raison qu'une nouvelle théorie à vue le jour et porte le nom « théorie des sous-ensembles flous».

##### **D.2.1. Théorie des sous-ensembles flous**

###### **Définition**

Sur un univers de discours  $U$ , un sous-ensemble flou  $A$  est défini par la donnée d'une fonction  $\mu_A(x)$

$$\begin{aligned} \mu_A : U &\rightarrow [0,1] \\ x &\rightarrow \mu_A(x) \end{aligned} \tag{D.1}$$

On définit le sous-ensemble flou  $A$  comme suivant :  $A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\}$  , où :  $\mu_A(x)$  est une fonction caractéristique d'appartenance qui prend ces valeurs dans l'intervalle  $[0,1]$ . Elle indique le degré d'appartenance de l'élément  $x$  à  $A$ , ainsi  $x$  au  $U$  pourrait :

- Ne pas appartenir à  $A$        $\mu_A(x) = 0$
- Appartenir un peu à  $A$        $\mu_A(x)$  est voisin de 0
- Appartenir assez à  $A$       entre 0 et 1
- Appartenir fortement à  $A$       est voisin de 1
- Appartenir à  $A$        $\mu_A(x) = 1$

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x} \quad (D.2)$$

$$A = \int_x \frac{\mu_A(x_i)}{x}$$

Si  $U$  est discret, on peut représenter l'ensemble  $A$  par :

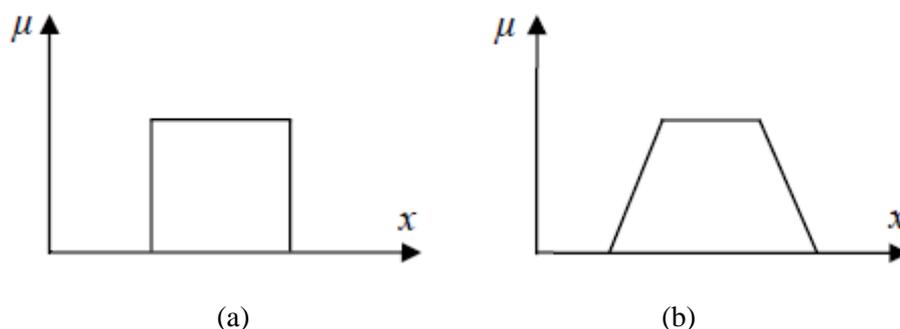


Figure B.1 : Exemple de fonction d'appartenance ; (a) Logique classique, (b) Logique Floue.

### D.2.2. Variable linguistique

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en générale des expressions floues comme [91].

- Quelque, beaucoup, souvent.
- Chaud, froid, rapide, lent.
- Grand, petit, ...etc.

Une variable linguistique est généralement décomposée en un ensemble de termes, qui couvrent tout son domaine de variation. Elle sera représentée par un triplé  $(x, T(x), U)$  dans lequel :

$x$  : est le nom de variable linguistique ;

$T(x)$  : ensemble des termes de variable linguistique ;

$U$  : l'univers de discours.

### D.2.3. Opérations sur les ensembles flous

Soient  $A$  et  $B$  deux ensembles flous dans  $U$  ayant respectivement  $\mu_A$  et  $\mu_B$  comme fonction d'appartenance, l'union, l'intersection et la complémentation des ensembles flous sont définis à l'aide de leur fonction d'appartenance.

#### D.2.3.1. Union (disjonction)

L'union de deux ensembles flous  $A$  et  $B$  de  $U$  est l'ensemble flou constitué des éléments de  $U$  affectés de plus grand de leurs deux degrés d'appartenance, elle est définie comme l'ensemble flou :  $C = A \cup B$  ( $A$  ou  $B$ ), tel que :

$$\forall x \in U \quad \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (D.3)$$

L'opérateur max est commutatif et associatif :

$$\begin{aligned} \mu_C(x) &= \max[\mu_A, \mu_B, \mu_C] \\ \mu_C(x) &= \max[\max[\mu_A, \mu_B], \mu_C] \\ \mu_C(x) &= \max[\mu_A, \max[\mu_B, \mu_C]] \\ \mu_C(x) &= \max[\max[\mu_A, \mu_C], \mu_B] \end{aligned} \quad (D.4)$$

#### D.2.3.2. Intersection (conjonction)

L'intersection de deux ensembles flous  $A$  et  $B$  de  $U$  est l'ensemble flou constitué des éléments de  $U$  affectés du plus petit de leurs deux degrés d'appartenance.

Elle est définie comme l'ensemble flou :  $D = A \cap B$  ( $A$  et  $B$ ), tel que :

$$\forall x \in U \quad \mu_D(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (D.5)$$

L'opérateur min est commutatif :

$$\mu_D = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min(\mu_B(x), \mu_A(x)) \quad (D.6)$$

#### D.2.3.3. Complémentation

La fonction d'appartenance  $\mu_{\bar{A}}$  du complément d'un ensemble flou  $A$  est définie tel que :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad (D.7)$$

**D.2.3.4. Produit cartésien**

Soient  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  des ensembles flous dans  $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$  respectivement le produit cartésien de  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , est un ensemble flou dans l'espace produit de  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ayant pour fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n} = \min \left( \mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n) \right) \quad (D.8)$$

**D.2.3.5. Egalité**

On dit que  $A$  et  $B$  sont égaux si et seulement si :  $\mu_B(x) = \mu_A(x)$

**D.2.3.6. Inclusion**

On dit que  $A \subset B$  si et seulement si  $\mu_B(x) \leq \mu_A(x)$

**D.2.3.7. Relation floue**

Soient  $U_1, U_2, \dots, U_n$  des univers de discours, une relation floue est un ensemble flou dans  $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$  exprimé comme suit :

$$R_{U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n} = \left\{ (x_1, x_2, \dots, x_n), \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n) / (x_1, x_2, \dots, x_n) \in U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n \right\} \quad (D.9)$$

**Composition de deux relations floues**

Soient les deux relations floues  $R_1$  dans  $U_1 \times U_2$  et  $R_2$  dans  $U_3 \times U_4$ . On définit la composition ( $\sup^*$ ) de  $R_1$  et  $R_2$  notée  $R_1 \circ R_2$

$$R_1 \circ R_2 = \left\{ (U_1, U_2)^* \sup \left( \mu_{R_1}(U_1, U_2)^* \mu_{R_2}(U_3, U_4) \right) / u_i \in U_i \right\} \quad (D.10)$$

Où (\*) représente une loi de composition pouvant être min, produit, ...etc.

**D.2.4. Fonction d'appartenance**

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles.

Les représentations graphiques des fonctions d'appartenances les plus utilisées sont illustrées dans la figure B.2, leurs expressions analytiques sont définies de la manière suivante :

- **la fonction triangulaire**, définie par trois paramètres  $a, b$  et  $c$ , soit :

$$\mu(x) \max \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right) \quad (D.11)$$

- **la fonction trapézoïdale**, définie par quatre paramètres  $a, b, c$  et  $d$  soit :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{D.12})$$

- **la fonction en cloche**, définie par deux paramètres,  $x_0$  qui détermine la position du sommet et  $a$  qui impose la largeur du domaine, soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2} \quad (\text{D.13})$$

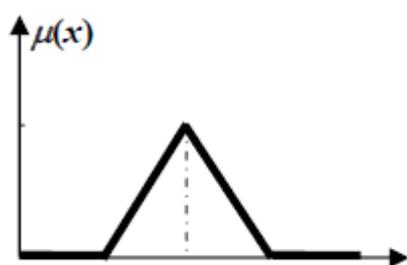
**la fonction gaussienne**, définie par deux paramètres  $\sigma, x_0$ , soit :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (\text{D.14})$$

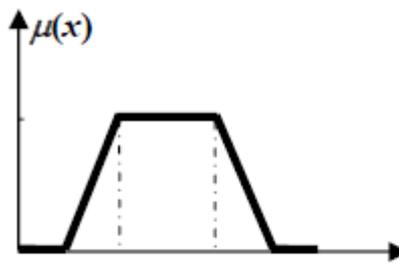
**la fonction sigmoïde**, définie par deux paramètres  $a, x_0$ , soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a \cdot (x-x_0))} \quad (\text{D.15})$$

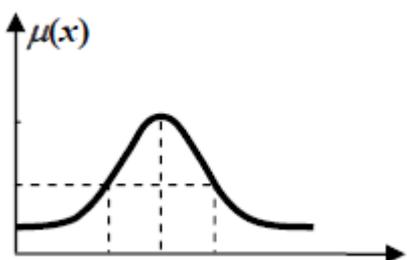
On notera que la forme rectangulaire correspond exactement à la logique classique, et que le triangle peut être considéré comme un cas particulier du trapèze, si les deux sommets qui correspondent aux valeurs  $a$  et  $c$  coïncident.



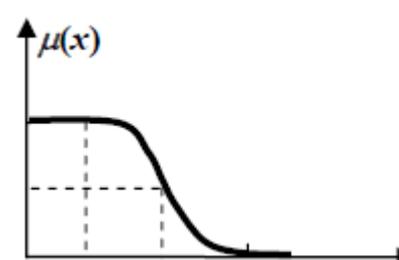
a. forme triangulaire



b. forme trapézoïdale



c. forme cloche



d. forme sigmoïde

Figure B.2 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

## D.2.5. Propositions floues

### D.2.5.1. Proposition floues élémentaires

Une proposition floue élémentaire est définie à partir d'une variable linguistique ( $V, X, Tv$ ) par la qualification « $V$  est  $A$  », pour une caractérisation floue  $A$ , appartient à  $Tv$

### D.2.5.2. Proposition floues générales

Une proposition floue générale est obtenue par la composition de propositions floues élémentaires « $V$  est  $A$  », « $W$  est  $B$  » pour des variables linguistiques  $V, W, \dots$

Plus généralement, on peut construire des propositions floues par conjonction, disjonction ou implication, par exemple de la forme « Si  $V$  est  $A$  et  $W$  est  $B$  alors  $U$  est  $C$  » (Si la taille est moyenne et le prix est peu cher, alors l'achat est conseillé).

## D.2.6. Raisonnement en logique floue

Les ensembles flous sont des éléments importants de la représentation des connaissances imparfaitement définies, pour raisonner sur telles connaissances, la logique classique ne suffit pas et on utilise une logique floue, lorsque les connaissances sont imprécises, vagues et éventuellement incertaines.

Après avoir exposé la répartition des valeurs mesurées en ensemble flous et défini les opérations sur ces ensembles, nous allons maintenant introduire le raisonnement flou et avoir comment un régulateur peut être exécuté sur la base des règles floues.

Avec l'unique schéma de raisonnement (Si les conditions sont remplies, Alors la conclusion est validée) et les trois opérateurs Et, Ou et Non, on peut déjà prendre un grand nombre de décisions logiques. On produit aussi une nouvelle information (une décision) à partir d'informations anciennes.

Le raisonnement flou fait appel à trois notions et étapes fondamentales:

- Implication floue.
- L'inférence floue.
- L'agrégation des règles.

### D.2.6.1. Implication floue

L'implication floue donne une information sur le degré de vérité d'une règle floue. En d'autre terme, on quantifie la force de véracité entre la prémisse et la conclusion.

Considérons par exemple les deux propositions floues : «  $x$  est  $A$  » «  $y$  est  $B$  » où  $x$  et  $y$  sont des variables floues et  $A$  et  $B$  des ensembles floues de l'univers de discours  $U$ .

Ainsi que la règle floue : Si «  $x$  est  $A$  » Alors «  $y$  est  $B$  ».

L'implication floue donne alors le degré de vérité de la règle floue précédente à partir des degrés d'appartenance de  $x$  à  $A$  (prémisse) et de  $y$  à  $B$  (conclusion).

On notera implication : opérateur  $imp$  (équivalent à l'opérateur Alors). Les normes d'implication les plus utilisées sont :

- **La norme Mamdani**

$$imp(\mu_A(x), \mu_B(y)) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (D.16)$$

- **La norme Larsen**

$$imp(\mu_A(x), \mu_B(y)) = (\mu_A(x) \times \mu_B(y)) \quad (D.17)$$

### D.2.6.2. Inférence floue

Le problème tel qu'il se pose en pratique n'est généralement pas de mesurer le degré de véracité d'une implication mais bien de déduire, à l'aide de fait et de diverses règles implicatives, des événements potentiels.

En logique classique, un tel raisonnement porte le nom de Modus ponens (raisonnement par l'affirmation).

$$Si P \Rightarrow q \text{ vrai, Et } P \text{ vrai, Alors } q \text{ vrai} \quad (D.18)$$

- **Modus Ponens généralisé**

De façon générale, les conditions d'utilisation de Modus Ponens généralisé sont montrées par le tableau suivant :

	<i>Prémisse</i>	<i>Conclusion</i>
Règle floue	Si $x$ est $A$	Alors $y$ est $B$
Fait observé	Si $x$ est $A'$	
Conséquence	$y$ est $B'$	

Tableau B.1 : Conditions d'utilisation de Modus Ponens généralisé.

- **Modus Tollen généralisé**

Ce principe se résume comme le montre le tableau suivant

	<i>Prémisse</i>	<i>Conclusion</i>
Règle floue	Si $x$ est $A$	Alors $y$ est $B$
Fait observé	$y$ est $B'$	
Conséquence	$x$ est $A'$	

Tableau B.2 : Conditions d'utilisation de Modus Tollen généralisé.

$A'$  et  $B'$  sont les ensembles flous constatés dans le cas que l'on traite et ne sont pas nécessairement égaux à  $A$  et  $B$ .

$B'$  est l'ensemble flou résultant de  $A'$  par l'application de l'implication. (MPG)

$A'$  est l'ensemble flou résultant de  $B'$  par l'application de l'implication. (MTG)

Les informations disponibles pour déterminer la conséquence sont donc d'une part celles relatives à la règle quantifiée par l'implication floue  $\mu_{B/A}(x, y)$ , d'autre part celles relatives au fait observé, quantifiées par la fonction d'appartenance  $\mu_A$

Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons :

- **Linguistiquement**

On écrit les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant :

**Si** la température est élevée **Et** la vitesse est faible **Alors** la tension est grande positive.

- **Symboliquement**

Il s'agit en fait d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des abréviations.

- **Par matrice d'inférence**

Elle rassemble toutes les règles d'inférences sous forme de tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées (température :  $T$  et vitesse  $V$ ). L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle. Il y a autant de cases que de règles.

Les règles que décrit ce tableau sont (sous forme symbolique).

$U$	$T$			<b>Si <math>T</math> est <math>F</math> et <math>V</math> est <math>F</math> alors <math>U = Z</math> ou</b>	
	$F$	$M$	$E$	<b>Si <math>T</math> est <math>M</math> et <math>V</math> est <math>F</math> alors <math>U = P</math> ou</b>	
$V$	$F$	$Z$	$P$	$GP$	<b>Si <math>T</math> est <math>E</math> et <math>V</math> est <math>F</math> alors <math>U = GP</math> ou</b>
		$Z$	$Z$	$P$	<b>Si <math>T</math> est <math>F</math> et <math>V</math> est <math>E</math> alors <math>U = Z</math> ou</b>

Tableau B.3 : Les règles sous forme symbolique.

Dans l'exemple ci-dessus, on a représenté les règles qui sont activées à un instant donné par des cases sombre :

Si  $T$  est  $M$  et  $V$  est  $F$  alors  $U = P$  ou

Si  $T$  est  $E$  et  $V$  est  $F$  alors  $U = GP$

Il arrive que toutes les cases du tableau ne soient pas remplies, on parle alors de règles d'inférences incomplètes. Cela, ne signifie pas que la sortie n'existe pas, mais plutôt que le degré d'appartenance n'est nul pour la règle en question.

Il s'agit maintenant de définir les degrés d'appartenance de la variable de sortie à ses sous-ensembles flous. On a présenté les méthodes d'inférence qui permettront d'y arriver. Ces méthodes se différencient essentiellement par la manière dont vont être réalisées les opérateurs (ici « et » et « ou ») utilisés dans les règles d'inférence.

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont : *Max-min*, *Max-produit* et *Somme-produit*.

#### ✓ Méthode d'inférence *Max-min*

Cette méthode réalise l'opérateur « Et » par la fonction « Min », la conclusion « Alors » de chaque règle par la fonction « min » et la liaison entre toutes les règles (opérateur « ou ») par la fonction « max ». La dénomination de cette méthode, dite max-min ou « implication de Mamdani » est due à la façon de réaliser les opérateurs « Alors » et « Ou » de l'inférence.

La fonction d'appartenance résultante correspond au maximum des deux fonctions d'appartenance partielles puisque les règles sont liées par l'opérateur « Ou ».

#### ✓ Méthode d'inférence *Max-produit*

La différence par rapport à la méthode précédente réside dans la manière de réduire la conclusion « Alors ». Dans ce cas, on utilise le produit.

On remarque que les fonctions d'appartenances partielles ici ont la même forme que la fonction d'appartenance dont elles sont issues multipliées par un facteur d'échelle vertical qui correspond au degré d'appartenance obtenu à travers l'opérateur « Et ». On l'appelle également « implication de Larsen ».

### ✓ Méthode d'inférence *Somme-produit*

Dans ce cas, l'opérateur « ET » est réalisé par le produit, de même que la conclusion « Alors ». Cependant, l'opérateur « OU » est réalisé par la valeur moyenne des degrés d'appartenance intervenant dans l'inférence.

D'autres méthodes ont été élaborées, ayant chacune une variante spécifique. Néanmoins, la méthode Max-Min est de loin la plus utilisée à cause de sa simplicité.

## Annexe (E)

### E. Paramètres de la chaîne de conversion éolienne basée sur une GADA

Les paramètres de la turbine éolienne de 7.5 MW basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation, sont illustrés dans le tableau suivant :

Paramètre	Symbol	Valeur
▶ Grandeurs mécaniques :		
Rayon de l'éolienne	$R$	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse	$G$	90
Inertie de l'arbre	$J$	1000 kg.m 2
▶ Grandeurs électriques :		
Tension Nominal	$V_s$	380
Nombre de paire de pôles		2
Vitesse nominal	$\Omega$	150 rad/s
Résistance d'enroulement du stator	$R_s$	0.455 $\Omega$
Résistance d'enroulement du rotor	$R_r$	0.62 $\Omega$
Inductance d'enroulement du stator	$L_s$	0.084 $\Omega$
Inductance d'enroulement du rotor	$L_r$	0.081 $\Omega$
Mutuelle inductance cyclique	$M$	0.078 $\Omega$

Tableau E.1 : Paramètres de l'éolienne de 7.5 MW.



## **Annexe (G)**

### **G.1. Groupe électrogène diesel industriel – K12 50 Hz**

Groupe électrogène WORMS<sup>®</sup> triphasé essence de 12 kVA avec démarrage électrique.  
Groupe électrogène très robuste, équipé d'un grand réservoir de 21 litres et d'un moteur YAMAHA EH 65

#### Caractéristiques alternateur :

Puissance maximum (400 V Tri): 10 kW / 12 kVA

Puissance continue (400 V Tri): 9,3 kW

Puissance maximum (220 V Mono) : 3,6 kW

Tension nominale : 400 V Triphasé – 230 V Monophasé

Courant nominal : 32 A

Vitesse nominale : 3000tr/mn

Type d'alternateur: à bague, 2 pôles

Régulation de la tension : condensateur

Fréquence : 50 Hz

Une prise Triphasée 400 V – 3P+T+N - 32 A

Une prise monophasée IP44 - 230V - 10/16 A

---

---

# **Références Bibliographiques**

---

---

- [1] M. Lopez, « *Contribution A L'optimisation D'un Système De Conversion Eolien Pour Une Unité De Production Isolée* », Thèse De Doctorat, Université De Paris-Sud, 2008.
- [2] O. Gergaud, « *Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé A Un Accumulateur* », Thèse De Doctorat, Ecole Normale Supérieure De Cachan, Décembre 2002.
- [3] Soro, Sielle Martin, « *Étude, simulation et contrôle d'un système d'énergies renouvelables intégrant une éolienne, des panneaux solaires et une génératrice au biodiesel* », Mémoire. Rimouski, Québec, Université du Québec 2017.
- [4] M. Muralikrishnan And V. Lakshminarayana, « *Hybrid (Solar And Wind) Energy System For Rural Electrification* », Arpn Journal Of Engineering And Applied Sciences, Vol. 3, No. 5, October 2008.
- [5] Efstathios E. (Stathis) Michaelides, « *Alternative Energy Sources* », Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [6] Ionel Vechiu, « *Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome* », Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de HAVRE, soutenu le 15/12/2005.
- [7] A. Dendouga, « *Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM)* » ; Thèse De Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, Février 2010.
- [8] B. Beltran, « *Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur* », Thèse de doctorat de l'université de Bretagne Occidentale, juin 2011.
- [9] Mezouar A, « *Décomposition et réduction de modèles des procédés électromécaniques : application à la commande des machines asynchrones* », Doctorat en Electrotechnique, université Djillali liabes Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, 2006.
- [10] Slotine J. J, « *Sliding controller design for nonlinear systems* », Int. J. of Cont. Vol. 4, No. 02, pp. 421–434, 1984.
- [11] Borni, A., Bouarroudj, N., Bouchakour, A., Zaghba, L. (2017) « *P&O-PI and fuzzy-PI MPPT Controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system: a comparative study* », Int. J. Power Electronics, Vol. 8, No. 4, pp.300– 322.
- [12] Makhloufi Salim, « *contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes* », thèse de doctorat en sciences, université de Batna, 2013.

- [13] E.Ian Baring-Goul, L. Flowers, P. Lundsager « *World wide status of wind-diesel application* » Pre-work shop Wind-diesel, Anchoray, Alaska, 2004.
- [14] J.R.Vaillant, « *Des recours immédiats à l'énergie solaire contre la pénurie d'énergie et la hausse des prix* », Ed. Eyrolles, France, 1980.
- [15] Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, CMED
- [16] Kamaruzzaman Sopian et al, « *Renewable Energy: Resources and Applications in Malaysi* », Pusat Tenaga Malaysia, pp 2, ISESCO, Science and Technology Vision, volume 01 may 2005.
- [17] Benoit Robyns, Arnaud Davigny, Bruno François, Antoine Henneton, Jonathan Sprooten, « *Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables* », collection science et technologies de l'énergie électrique dirigée, Lavoisier, CACHAN, 2012.
- [18] Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie [www.enp-oran.dz/wpcontent/uploads/2017/11/article-10.pdf](http://www.enp-oran.dz/wpcontent/uploads/2017/11/article-10.pdf)
- [19] Renewable Energy policy network for the 21st century 2016 Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2016, [www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings\\_French.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_French.pdf)
- [20] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed and H. Benalla, « *Modélisation, Simulation et Contrôle d'une Turbine Eolienne à Vitesse Variable basée sur la Génératrice Asynchrone à double alimentation* », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14 N°1, pp. 109-120, 2011.
- [21] Emeric\_Tapachès « *Estimation du Potentiel de la Technologie Solaire Thermodynamique à Concentration en Climat Non Désertique* », thèse Doctorat soutenus en Avril 2015
- [22] Bilel Bouassida, « *Simulation d'une centrale solaire à concentrateur cylindro-parabolique sous TRNSYS* » École nationale d'ingénieur - Ingénieur en génie énergétique 2013.
- [23] Melle BRIHMAT Fouzia, « *Étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Éolien* ». Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [24] H Kanchev , « *Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain* », thèse soutenue a l'école centrale de lille, le 24 janvier 2014.

- [25] F.Z. Kedaid, « *Développement de la base de données géothermiques de l'Algérie par un système d'information géographique* » revue Centre de Développement des Énergies Renouvelables, accepté le 21 Novembre 2006)
- [26] France Agrimer, 2012, La méthanisation état des lieux et perspectives de développement, n° 1 « *Biomasse* », 12 p., disponible sur : <http://www.franceagrimer.fr/content/download/16180/122245/file/methanisation-enfrance.pdf>.
- [27] [www.europa.eu.int/comm/energy\\_transport/atlas/htmlu/wavint.html](http://www.europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint.html)
- [28] Ecole Centrale de Nantes : [www.ec-nantes.fr](http://www.ec-nantes.fr)
- [29] Christine Lins, « *Renewables 2015 global status report* », Rapport d'évolution mondiale de l'énergie renouvelable, Paris, France, 2015.
- [30] Khier Nacira, Rabia Mimouna, Boudier Abdelmadjid, « *La politique énergétique de l'après hydrocarbures en ALGERIE* », 1er Colloque International sur Hydrocarbures, Énergies et Environnement –HCEE-, OUARGLA 23/ 24 novembre 2014.
- [31] J. Ernst and W. Leonhard. « *Optimisation of wind energy output of variable speed wind turbines* ». In Wind Power, San Francisco, CA, 1985.
- [32] S. Mathew, « *Wind Energy : Fundamentals, Resource Analysis and Economics* », Springer, Germany, 2006.
- [33] I.Salhi, S.Doubabi, N.Essounbouli And A.Hamzaoui, « *Application Of Multi-Model Control With Fuzzy Switching To A Micro Hydro-Electrical Power Plant* ». Renewable Energy, 35(9) :2071(2079) ,(2010).
- [34] <https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-en-europe-et-dans-le-mondeen-2017-180214>
- [35] A. Mirecki, « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [36] Armand Boyette, « *Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec Système de Stockage pour la Production Eolienne* », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, France, 2006.
- [37] T.Ghennam, « *Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation* », Thèse de doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Sept 2011.

- [38] F. Poitiers, « *Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau* », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [39] N. Khezami, « *Commande Multi Modèle Optimale des Eoliennes : Application à la participation des Eoliennes au Réglage de la Fréquence* », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Octobre 2011.
- [40] S.Ghoudelbourk, «*Etude Et Modélisation Des Convertisseurs Statiques Dans Une Chaîne Eolienne A Base De La Gada*»,Thèse Doctorat, Université D'annaba, Algérie, 2016.
- [41] J. Lopez, P. Sanchis, X. Roboam, and L.Marroyo, « *Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips* ». IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 3, pp. 709–717, Sep. 2007.
- [42] S. Bhowmik, R. Spee, and J. H. R. Enslin, « *Performance optimization for doubly fed wind power generation systems* ». IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 35, no. 4, pp. 949– 958, Jul./Aug. 1999.
- [43] R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, and G. Asher, « *Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications* ». IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 7, pp. 2776–2798, Jul. 2013.
- [44] L. Peng, « *Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension* », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, juin 2010.
- [45] A.Telli, « *Etude Et Commande D'une Eolienne A Vitesse Variable Intégrée Au Réseau Mt* », Mémoire De Magister Université Mohamed Boudiaf D'Oran, Algérie, 2012.
- [46] J. Chen, J. Chen, C. Gong, and X. Deng, « *Energy management and power control for a stand-alone wind energy conversion system* », in Proc. IEEE IECON, 2012, pp. 989–994.
- [47] S. Muller, M. Deicke, R. W. De Doncker, « *Doubly fed induction generator systems for wind turbines* », IEEE Industry Applications Magazine, pp. 26-33, May-June 2002.
- [48] S. El Aimani, « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille, France, 2004.
- [49] T. Ghennam, « *Supervision D'une Ferme Eolienne Pour Son Intégration Dans La Gestion D'un Réseau Electrique, Apports Des Convertisseurs Multi Niveaux Au*

- Réglage Des Eoliennes A Base De Machine Asynchrone A Double Alimentation », Thèse De Doctorat De L'école Militaire Polytechnique D'Alger, 2011.
- [50] Arnaud G, « *Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service* », thèse de doctorat ; Université Henri Poincaré, Nancy-I- 2010.
- [51] E, DE Vries , « *wind turbines technology trends* » vol6, N°4, jarnes et janes (science publishers), renewable energy world , July .august 2003.
- [52] Chatelain J, « *Machines électriques, Traite d'électricité* », Volume X, Presses Polytechniques et Universitaires romandes, Suisse, 1983.
- [53] Y. Djeriri , « *Commande Par Réseaux de Neurones d'une MADA Intégrée à un Système Eolien* », Mémoire de Magister Université Djillali Liabes de Sidi Bel- Abbés ,2009.
- [54] Hopfensperger B, et Atkinson D. J., « *Doubly-fed a.c machines: classification and Comparison* », European conf. Power Electronics and Applications (EPE), pp.1-17, Graz, 2001.
- [55] Vicators H.S, J.A Tegopoulos , Fellon .IEEE « *Transient State Analysis of A Doubly FED induction generator under Three Phase short circuit* » IEEE national Technical University of Athens, Department of electrical engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol. 6, NO. 1, March 1991.
- [56] Riyadh, Rouabhi. « *Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application, Energie éolienne* » Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif 1, (2012).
- [57] Salloum, G. « *Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation* » (Thèse de Doctorat, Université Toulouse, INPT) (2007).
- [58] Guy Segulier, Francis Notelet, « *Electrotechnique industrielle* » ; Edition Lavoisier, 2006.
- [59] Khojet El Khil. S, « *Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) : optimisation des pertes dans les convertisseurs : reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé* » Thèse de Doctorat, Université Toulouse, INPT, 2007.
- [60] Djeriri Youcef : « *Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle* », Thèse de doctorat université Djillali Liabes de sidi bel-abbés faculté des sciences de l'ingénieur, 2015.

- [61] S. EL AIMANI : « *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », Thèse de doctorat Ecole Centrale de Lille ,2004.
- [62] Youcef Bekakra. « *Contrôle des puissances actives et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation* » Thèse de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra ; 2014.
- [63] Paul-Etienne VIDAL : « *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation* ». Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [64] B. Hopfenspeger et D.J.Atkinson, « *Doubly-fed a.c. machines : classification and comparison* », European Conference on Power. Electronics and Applications (EPE), Gras, 2001.
- [65] S. Drid, « *Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : théorie et expérimentation* », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [66] I. HAMZAOUI « *Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur* » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [67] Y.Djeriri, « *Commande Directe Du Couple Et Des Puissances D'une Mada Associée A Un Système Eolien Par Les Techniques De L'intelligence Artificielle* », Thèse De Doctorat, Universite De Sidi Bel Abbes, Algérie, 2015.
- [68] Ekanayake J, Holdsworth L, Wu X, et al, « *Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines* », IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2):803-809.
- [69] J. Rodriguez, J.S. Lai, F.Z. Peng : *Multilevel Inverters : A Survey of Topologies, Controls, and Applications*. IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 49, N° 3, pp. 724-738, August 2002.
- [70] M.D. Manjrekar : *Topologies, Analysis, Controls and Generalization in HBridge Multilevel Power Conversion*. PhD thesis, University of Wisconsin, Madison, 1999.
- [71] S. Mariethoz : *Etude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques: topologies, modulation et commande*. Thèse EPFL N° 3188, (2005) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [72] J.Song-Manguelle : *Convertisseurs multiniveaux asymétriques alimentés par transformateurs multisecondaires basse-fréquence: réactions au réseau d'alimentation*. Thèse EPFL N° 3033, (2004), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

- [73] B. P. McGrath, D. G. Holmes : Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 49, N° 4, pp.858-867 aug. 2002.
- [74] S. K. Mondal, B. K. Bose, V. Oleschuk, and J. O. P. Pinto : Space vector pulse width modulation of three-level inverter extending operation into overmodulation region. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, N° 2, pp. 604–611, Mar. 2003.
- [75] A. Rufer, N. Schibli, T. Nguyen : A three-phase multilevel converter for high-power induction motors, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, N° 5, pp.978-986, 1998.
- [76] J. Song-Manguelle, S. Mariethoz, M. Veenstra, A. Rufer : A Generalized design principle of a uniform step asymmetrical multilevel converter for high power conversion. European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'01, Graz, Austria, 2001.
- [77] M. Benkahla, R. Taleb, Z. Boudjema, A new robust control using adaptive fuzzy sliding mode control for a DFIG supplied by a 19-level inverter with less number of switches, Electrical Engineering & Electromechanics (EEE), vol. 2018, no. 04, pp. 11 - 19, 2018.
- [78] S. R. Bowes, Y. S. Lai : The relationship between space-vector modulation and regular-sampled PWM, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.44, N° 5, pp.670-679, Oct. 1997.
- [79] A. Boyette, « *Contrôle–commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* », Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, France, 2006.
- [80] F. Boudjema. « *Commande par mode de glissement : Application aux convertisseurs lectriques* ». Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université du Paul Sabatier de Toulouse, Mai, 1991.
- [81] W. Gao J.E. Hung. « *Variable structure control system* ». IEEE Trans. Ind. Elec. VoL40, N°1. pp45-55, February 1993.
- [82] Y. Hung W. Gao, I. Hung. « *Variable structure control : A survey* ». IEEE Trans. Ind. Elec. Vo1.40, N°1. pp 2-22, February 1993.
- [83] Floquet T, « *Contribution à la commande par modes glissants d'ordre supérieur* », Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies, Lille (France), 2000.
- [84] A. AOUIFI, « *Utilisation d'observateurs à modes glissants pour le contrôle direct de couple et le contrôle vectorielle d'une machine asynchrone à cage,* » Université Mohamed Khider-Biskra, 2011.

- [85] A. Hussain. « *Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants* ». Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2009.
- [86] M. KENDZI, « *Commande des génératrices asynchrone utilisées dans les systèmes éoliens Mémoire de Magister* », Université de Bechar, Algérie 2012
- [87] C. C. Chan, H. Q. Wang, « *New scheme of sliding mode control for high performance induction motor drives* », IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 03, pp.177–185, 1996.
- [88] A. Gayed, « *Contribution à la commande par mode de glissement d'une machine synchrone à aimants permanents* », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1996.
- [89] K. Kouzi. « *Commande vectorielle d'un moteur à induction sans capteur vitesse par un réglage PI-Flou à gains flou adaptés associé à un observateur d'état par mode de glissement* ». Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister, Université de Biskra, 2002.
- [90] Utkin V. I, « *Variable structure systems with sliding modes* », IEEE Trans. On Aut. Cont., Vol. AC-22, pp. 212–222, 1977.
- [91] Hung J. Y, W. Gao, J.C. Hung, « *Variable structure control: A Survey* », IEEE Trans. On Ind. Electron. Vol. 40, No. 01, pp. 2–22, 1993.
- [92] M. Manceur, « *Commande robuste des systèmes non linéaires complexes* », Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2012.
- [93] Sezai T, Ibrahim Eksin and Mujdi Gûzelkaya, « *A new approaches for on-line tuning of the linear sliding surface slope in sliding mode controllers* », Turk J. Engin, Vol.11 N°1 2003.
- [94] Kh. Belgacem, A. Mezouar, A. Massoum, « *Sliding Mode Control of a Doubly-fed Induction Generator for Wind Energy Conversion* », International Journal of Energy Engineering, Vol. 03, N°01, pp 30-36, 2013. Doi: 10.5923/j.ijee.20130301.05.
- [95] E. H. Rabaa, « *Génération automatique et optimisation de systèmes à inférence floue* », Thèse Doctorat de l'Université Paris IIX Val de Marne, 2003.
- [96] F. Hamidia, « *contribution à la modélisation et à la commande neuro-floue de machines électriques* », Thèse de Doctorat ENP, Alger, 2013.
- [97] W. S. Lin and C. S. Chen, « *Robust adaptive sliding mode control using fuzzy modelling for a class of uncertain mimo nonlinear systems* », IEE on Control Theory and Applications, 149(3) :193–201, 2002.

- [98] Y.-T. Huang, T.-C. Kuo, And S. H. Chang, « *Adaptive sliding-mode control for nonlinear systems with uncertain parameters* », In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. 32, No. 4, pp. 517–521 (November 2002).
- [99] H. Naim, N. Benabadji, A. Bouad, « *Conception et réalisation d'un moniteur solaire multicanaux* » Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa ; 313 – 318, 2012.
- [100] F. Bouchafaa, « *Etude et commande de différentes cascades à onduleur neuf niveaux à structure NPC. Application à la conduite d'une MSAP* », Thèse de doctorat, ENP d'Alger, Algérie, 2006.
- [101] O. Amrani, D. Rekioua, « *Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques* », International conference ICEA'06, Sidi Bel Abbes, 22-23 Mai 2006.
- [102] D. Pellion, « *Modélisation, fabrication et évaluation des photodiodes à avalanche polarisées en mode Geiger pour la détection du photon unique dans les applications astrophysiques* », Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, 2008.
- [103] Yiannis Tripanagnostopoulos, Hybrid Photovoltaic/Thermal Collectors, Building Integration of Solar Thermal Systems – TU1205 – BISTS, Univ. of Patras, Patra, Greece.
- [104] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [105] Sébatien MARC et al. « *Rapport de stage* », Pré-étude d'un système couplé photovoltaïque/thermique », Université JOSEPH FOURIER. 2010.
- [106] M. Zandi, « *Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2010.
- [107] S. Diaf, « *étude et optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque* », Thèse de Magister, Université de Boumerdès, 2002.
- [108] N. Kabouch, « *Optimisation d'un système photovoltaïque application a la protection cathodique* », mémoire de magister, université de la sciences et de la technologie Hourri Boumediène (USTHB), Alger, 2009
- [109] Y. Pankow, « *Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque* », thèse de doctorat, centre nationale de recherche technologique de Lille, 2004
- [110] Z. Bendjellouli, « *Contribution a la modélisation d'une cellule solaire* », mémoire de magister, université de Bechar, 2009

- [111] K. Agroui, A. Belghachi et S. Kadri, « *Caractérisations Electriques et Thermiques d'un Module PV au Silicium Multicristallin en Milieu Contrôlé et sur Site Saharien* », Revue des Energies Renouvelables, ICPWE Energies Photovoltaïque et Eolienne, Tlemcen, 20-22 Décembre 2003, pp. 19-25, 2003.
- [112] A. C. Pastor, « *Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electronique* », Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse (France), 29 septembre 2006.
- [113] N. Mohan, W. P. Robbin, and T. Undeland, « *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* », 2nd Edition, New York, Wiley, 1995
- [114] M. Sahlhi, R. El- Bachtiri, E Matagne, « *The development of the new maximum power point tracker for a PV panel* », REPEER Group, LESSI laboratory, Faculty of sciences dhar el-Mehrez, USMBA University, Received: 21 Sept 2007; accepted: 29 Oct 2007
- [115] S. Mariéthoz, S. Almér, M. Bâja, A.G. Beccuti, D. Patino, A. Wernrud, J. Buisson, H. Cormerais, T. Geyer, H. Fujioka, U.T. Jönsson, C.Y. Kao, M. Morari, G. Papafotiou, A. Rantzer, and P. Riedinger, « *Comparison of hybrid control techniques for buck and boost dc-dc converters* », IEEE Transactions on control Systems Technology (2010), no. 5, 1126–1145.
- [116] M. Bencherif, « *Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension* », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2014.
- [117] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, « *Adaptive Perturb & Observe MPPT Algorithm for Photovoltaic System* », 2013 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2013, pp. 42-47.
- [118] M. A. Elgendy, B. Zahawi, et D. J. Atkinson, « *Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications* », IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no 1, p. 21 -33, janv. 2012.
- [119] J. Kivimaki, S. Kolesnik, M. Sitbon, T. Suntio, et A. Kuperman, « *Design Guidelines for Multiloop Perturbative Maximum Power Point Tracking Algorithms* », IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no 2, p. 1284 -1293, févr. 2018.
- [120] W. Xu, C. Zeng, J. Lv, J. He « *One Novel Variable Step-Size MPPT Algorithm for Photovoltaic Power generation* » Conference on IEEE Industrial Electronic Society, vol.10, 2012, pp. 5750-5755.

- [121] M. Killi, S. Samanta, « *Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems* », IEEE Trans. Industrial Electron., Vol. 62, no.9, 2015, pp. 5549 - 5559.
- [122] K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, S. Mekhilef, « *An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)-Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation* » IEEE Trans. Power Electron, Vol.27, no.8, 2012, pp: 3627-3638.
- [123] A.Belhadj djilali, B.Hemici, A.Yahdou, « *Eliminating search mode deviation of maximum power point tracking in photovoltaic system control by using modified perturb and observe technique* », The Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol. 13, No. 2, pp. 758-766 , Avril 2017.
- [124] A.Belhadj djilali, B.Hemici, A.Yahdou, « *Modified perturb and observe MPPT control for avoid deviation in photovoltaic systems* », Journal of Electrical Engineering, VOL.17,No.1,pp.1-10,2017.
- [125] I. Kamwa, B. Saulier, « *Modélisation, simulation et régulation d'un réseau éolien/diesel autonome* », Rapport N°IREQ 4340, Varennes, Canada, 1989.
- [126] Yeager, k. E, J. R. Willis « *Modeling of emergency diesel generateurs in 800 megawatt nuclear power plant* », IEEE transaction on energy conversion, vol. 8, n°3, p. 433-41, in 1993
- [127] M.S. Ismail, M. Moghavvemi, T.M.I. Mahlia, « *Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate* », Energy Convers Manage, 69(2013)pp.163-173.
- [128] V. Ganesan, Internal combustion engines, Tata McGraw Hill Education, 2012.
- [129] S. El-Hefnawi, « *Photovoltaic diesel-generator hybrid power system sizing,*» *Renewable Energy*, vol. 13, n° 11, p. 33-40, 1998.
- [130] G. Notton, M. Muselli et A. Louche, « *Autonomous hybrid photovoltaic power plant using a back up generator: a case study in a Mediterranean Island* ,» *Renewable Energy*, vol. 7, n° 14, p. 371-391, 1996.
- [131] Sigma Engineering, « *Etude générale des questions énergétiques dans les collectivités éloignées du Canada* » préparé pour le programme de démonstration dans les collectivités éloignées. Énergie, Mines et ressources Canada, Mars 1985.
- [132] E. Aitor, « *Microgrid Hybrid Energy Storage Integration and Three Level NPC converter* », Thèse doctorat, Université Bordeaux 1, 2012
- [133] Jeremy, L. « *Modélisation, Dimensionnement et Optimisation des Systèmes d'Alimentation Décentralisés à Energie Renouvelables- Application des Systèmes Multi-*

- Agents pour la Gestion de l'Energie* ». PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.
- [134] Valenciaga, F. and Puleston, P. F. « *Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy* ». IEEE Transactions. Energy Conversion pp.398–405, 2005.
- [135] F. Baghdadi, « *Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation Hybride de conversion d'Energies Renouvelables* », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [136] Junhong Zhang, Jih-Sheng Lai and Wensong Yu. « *Bidirectional dc-dc converter modeling and unified controller with digital implementation* ». In Applied Power Electronics Conference and Exposition, pages 1747–1753, 2008.
- [137] Gomis-Bellmunt .O, Montesinos-Miracle .D, Galceran-Arellano .S and Rull- Duran .J. « *Sliding mode control based buck-boost bidirectional converter to drive piezoelectric loads* ». Journal of Electrical Energy, 90 :115–125, 2007.
- [138] A. Idda , S. Bentouba , « *Hybridation d'une Centrale Diesel en Energie Photovoltaïque: Effet de l'ajout d'un système de stockage* », La Conférence Nationale: Energie Hydrocarbure et Environnement, 3-4 Décembre 2014.
- [139] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah, E.M. Berkouk, S. Diaf , H. Belmili « *Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque* », Revue des Energies Renouvelables, Vol.17, N0.3, pp.359-376, 2014.
- [140] R. Belfkira, L. Zhang, G. Barakat, « *Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit* », Solar Energy, Vol. 85, pp. 100-110, 2011.
- [141] T. M. Layadi, G. Champenois, « *Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources* », Symposium de Génie électrique, 8-10 juillet 2014, France.
- [142] I.E. Kafazi, R. Bannari, A. Abouabdellah, « *La modélisation et l'optimisation des systèmes de production complexes ; application aux réseaux énergétiques: Etat de l'art et Comparaison de modèles* », Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, Décembre 2015, Tanger, Maroc.

---

---

# Résumé

---

---

## ملخص

يعتبر تواجد مصادر الطاقة الأولية التي تغذي عدة تطبيقات ذات إستعمالات جد حساسة مثل مرحلات الاتصالات اللاسلكية والمراكز الحدودية والسكنات المعزولة والمستوصفات .. الخ، في غياب شبكة الكهرباء الافتراضية شيء جد ضروري وحيوي ويشترط في معظم الحالات سلامة المنشآت واشتغالها بصفة دائمة.

إن الحلول التكنولوجية الكلاسيكية المتوفرة و التي تعتمد على التخزين الإلكتروكيميائي الاعتيادي، تعتبر حولا باهظة الثمن ومحدودة تقنيا سواء من ناحية الاستطاعة الصغيرة المنتجة أو السعة المحدودة .وكذلك التي تعتمد على المولدات الكهربائية تتطلب إمدادا بالوقود وصيانة دائمين مصحوبين بصخب وتلوث. تأتي الحلول التكنولوجية الجديدة والناجمة عن النظم الهجينة لتوليد الطاقة الكهربائية بديلا جد منافس للحلول العادية بالرغم من تكلفتها الباهظة نسبيا في الوقت الحالي وذلك نظرا للأمان العالي الذي توفره هذه الحلول.

الهدف من أطروحتنا يتفرع الى قسمين، القسم الأول يهتم بدراسة تقنيات السيطرة القوية على المولدة، القدرة على تعظيم إنتاج طاقة الرياح وخاصة باستخدام المولدة اللامتزامنة مزدوجة التغذية. مع تعظيم الاستفادة، فإننا لا نعني فقط تحسين نوعية الطاقة وكفاءة استخدامها ولكن أيضا تقليل الأحمال الميكانيكية، الأمر الذي تنتج عنه امكانية تصنيع توربينات هوائية أخف وزنا وبالتالي تحسين الإنتاجية. للقيام بذلك، اكتشفنا مساهمة أوضاع انزلاقات التقليدية ثم ذات الانزلاق الضبابي التكيفي في تلبية دفتر الشروط المحدد. الهدف الثاني يكمن في دراسة و محاكاة النظام الهجين الذي يستعمل الرياح و الشمس و ديزل ، مع وحدة تخزين، لتغذية متلقي محلي. بعد نمذجة وتصميم ما تبقى من مختلف الهيئات التأسيسية للنظام الهجين، تم اختبار النظام ككل بواسطة عمليات محاكاة رقمية التي سمحت بالمصادقة على التقنيات المقترحة. و مع ذلك فإنها لم تصل بعد إلى حد الكمال مما يمهد الطريق أمام آفاق مستقبلية مثيرة للاهتمام.

### الكلمات المفتاحية

طاقة متجددة، مولدة لامتزامنة مزدوجة التغذية، وضع الانزلاق التكيفي ، وضع انزلاق غامض التكيفي ، ضوئية، طاقة هوائية، ديزل، نظام هجين، تخزين.

## Résumé

Pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de Télécommunication, les postes frontières, l'habitat isolé, les dispensaires, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle, la disponibilité permanente de la source primaire d'énergie est vitale et conditionne dans une très large mesure, la fiabilité des installations et leur fonctionnement permanent.

Les solutions technologiques classiques apportées par le stockage électrochimique conventionnel sont onéreuses, limitées techniquement en puissance et restreintes en capacité. Celles apportées par les groupes électrogènes, de part la nécessité d'approvisionnement en carburant et celle de leur maintenance, présentent des inconvénients liés le bruit, la pollution

et surtout leur mauvais rendement à charge partielle. Les nouvelles solutions technologiques, apportées par les systèmes hybrides, même si elles ne sont pas encore économiquement compétitives, offrent par contre une sûreté élevée. Toutefois, à la vue de la nécessité du développement durable, ces solutions, avec l'appui de la volonté publique, peuvent être économiquement viables, à moyen et long terme.

L'objectif de nos travaux de thèse est scindé en deux parties, la première consiste à étudier les techniques de commande robustes de la génératrice, susceptibles d'optimiser la production énergétique d'une éolienne, en particulier celle utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation. Par optimisation, nous entendons non seulement améliorer la qualité de l'énergie produite et le rendement énergétique mais aussi diminuer les charges mécaniques de fatigue ; ce qui aurait pour conséquence de rendre possible la fabrication d'aéroturbines plus légères améliorant de ce fait la productivité. Pour ce faire, nous avons exploré l'apport des modes glissants classiques puis mode glissants flous adaptatifs pour répondre au cahier des charges fixé. La deuxième partie du travail traite l'étude et la simulation du système hybride éolien/photovoltaïque/diesel avec unité de stockage, alimentant un récepteur local. Après avoir modélisé et dimensionné le reste des différents organes constituant le système hybride, l'ensemble a été testé par des simulations numériques qui ont permis la validation des techniques proposées. Elles restent cependant perfectibles ouvrant ainsi la voie à des perspectives intéressantes.

### **Mots clés**

Energie renouvelable, génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), énergie éolienne, mode glissant adaptatif, mode glissant flou adaptatif, photovoltaïque, diesel, système hybride, stockage.

## **Abstract**

For very many applications of significant and strategic interest like the relays of Telecommunication, the border posts, the insulated habitat, the dispensaries, etc, except network conventional electricity, the permanent availability of the primary source of energy is vital and conditions in a very broad measurement, the reliability of the installations and their permanent operation.

The traditional technological solutions brought by conventional electrochemical storage expensive, are limited technically in power and are restricted in capacity. Those brought by the power generating units, of share the need for provisioning while carburizing and that of their maintenance, present dependent disadvantages the noise, pollution and especially their bad output with partial load. The new technological solutions, brought by the hybrid systems, even if they are not yet economic competitive, on the other hand offer a high safety. However, with the sight of the need for the durable development, these solutions, with the support of the public will, can be economically viable, in the medium and long term.

The aim of our thesis is divided in two parts, the first is to study the techniques of robust control, generator, can optimize the production of wind, especially using a doubly fed induction generator. By optimization, we mean not only improve the quality of energy and energy efficiency but also reduce mechanical fatigue loads; which would have the effect of making it possible to manufacture aero turbines lighter thereby improving productivity. To do this, we explored the contribution of conventional sliding mode and adaptive fuzzy sliding mode controller to meet the specifications set. The second part was to study and simulation of wind/ PV/ diesel hybrid system with storage unit feeding a local receiver. After modeling and design of the rest of the various constituent parts of the hybrid system, the all system has been tested by numerical simulations that allowed the validation of the proposed techniques. However, they still perfectible paving the way for interesting prospects.

**Key words**

Renewable energy, doubly fed induction generator (DFIG), wind power, adaptive sliding mode, adaptive fuzzy sliding mode, photovoltaic, diesel, hybrid system, storage