

الجامعة الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة -

Université Saida Dr Tahar Moulay -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Par : KRIM Torkia
MAHIOUSE Hadjira

Sujet

Contrôle intelligent d'un micro-réseau à courant continu

Soutenue publiquement en **15/09/2022** devant le jury composé de :

Mr. BOUAZA Saad

MAA

Univ. Saida

Président

Mr. LAOUER Mohammed

Pr

Univ. Saida

Rapporteur

Mr. BOUANANE Abdelkrim

MCA

Univ. Saida

Examinateur

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a donné la foi, nous a guidé durant toute notre vie et nous a donné la volonté de continuer nos études.

Au début, il est très agréable d'exprimer nos reconnaissances à tous ceux qui nous ont aidés scientifiquement, matériellement et moralement à réaliser ce travail.

Nous exprimons aussi notre gratitude, la plus profonde à Monsieur

Pr. LAOUER Mohammed qui a bien voulu nous confier ce sujet, et

qui a assuré l'encadrement de ce travail, Nous lui reconnaissions

son entière disponibilité, son aide inestimable et ses conseils sans

lesquels ce travail n'aurait pu aboutir.

Nous adressons nos vifs remerciements à l'ensemble des membres de jury d'avoir accepté de juger notre mémoire et en particulier le Dr BOUANANE d'avoir pris tout son temps d'examiner notre travail et de le valoriser ainsi que le Dr SAAD de présider la séance de notre soutenance.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à:

- *Mes parents.*
- *Mes frères et mes sœurs.*
- *Toutes mes familles sans exception*
- *Mes amies*

En fin, je dédie ce travail, à tous ceux qui m'ont aidé à le mettre au point.

Torkia

Hadjira

TABLE DES MATIÈRES

Désignation	Page
Figures	I
Tableaux	IV
Liste des acronymes	V
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables	
1.1 Introduction	3
1.2 Définition	3
1.3 Les différents types des énergies renouvelables	3
1.3.1 La biomasse	3
1.3.2 L'hydraulique	4
1.3.3 La géothermie	4
1.3.4 L'hydrogène	4
1.3.5 Le solaire	5
1.3.5.1 Energie solaire photovoltaïque	5
1.3.6 L'éolienne	7
1.3.6.1 Constitution d'un système éolien	7
1.3.6.2 Classification des éoliennes	8
1.3.7 Conclusion	9
Chapitre 2 : Micro réseau et contrôle intelligent	
2.1 Introduction	10
2.2 Définition du micro-réseau	10
2.3 Types de MicroGrid	11
2.3.1 MicroGrid CA	11
2.3.2 MicroGrid CC	12
2.3.3 Système de micro-réseau hybride CC/AC	13
2.4 Architecture de micro-réseau	13
2.4.1 Configuration de la grille radiale	13
2.4.2 Configuration du réseau bouclé	14
2.4.3 Configuration du micro réseau de type maillage	15
2.5 Modes de fonctionnement des MicroGrids	15
2.5.1 Mode îlot	15
2.5.2 Mode connecté au réseau	15
2.5.3 Réseau connecté en mode îlot	16
2.6 Classification de contrôle du MicroGrid	16
2.6.1 Contrôle centralisé	16
2.6.2 Contrôle décentralisé	16
2.6.3 Contrôle distribué	16
2.6.4 Contrôle hiérarchique	17

2.7 Classification des micros réseaux intelligents	18
2.7.1 MicroGrids des zones commerciales, artisanales ou industrielles	18
2.7.2 MicroGrids de campus universitaire	18
2.7.3. MicroGrids alimentant des zones isolées car faiblement ou non raccordées aux réseaux électriques ou temporairement coupées du réseau pour cause d'intempéries	19
2.7.4 Eco quartiers	19
2.7.5 Micro réseaux de « base vie » (camp militaire ou hôpital)	19
2.8 Défis techniques sur les MicroGrids	19
2.9 Technologies de micro-réseau	20
2.10 Composants d'un MicroGrid	21
2.11 Avantages d'un micro-réseau	22
2.12 Inconvénients des micro-réseaux	23
2.13 Conclusion	23
Chapitre 3 : Modélisation et commande des composants du micro réseau	
3.1 Introduction	24
3.2 Stockages d'énergie	24
3.2.1 Modèle A	25
3.2.2 Modèle B	27
3.2.3 Contrôler	29
3.3 Éolienne	31
3.3.1 Modèle	33
3.3.2 Contrôle	35
3.4 Photovoltaïque	37
3.4.1 Modèle	40
3.4.2 Contrôle	40
3.5 Micro-turbine à gaz	42
3.5.1 Contrôle	44
3.6 Conclusion	47
Chapitre 4 : Simulations et étude	
4.1 Introduction	48
4.2 Cas 1	48
4.3 Cas 2	53
4.4 Cas 3	56
4.5 Cas 4	60
4.6 Conclusion	61
Conclusion générale	
Annexe	62
Bibliographie	64
	70

LES FIGURES

- Figure 2.1** : Schéma d'un MG
- Figure 2.2** : Microgrid AC
- Figure 2.3** : CC Micro réseau
- Figure 2.4** : Système de micro-réseau hybride CA/CC
- Figure 2.5** : Radial, configurations de grille
- Figure 2.6** : Configurations d'un micro réseau bouclé.
- Figure 2.7** : Configurations du réseau MESH
- Figure 2.8** : Classification des techniques de contrôle du microgrid et de la structure de la couche fonctionnelle
- Figure 2.9** : Niveaux hiérarchiques de contrôle
- Figure 2.10** : Classement MG
- Figure 2.11** : Micro turbine
- Figure 2.12** : Un schéma de principe du disjoncteur sur la connexion au réseau
- Figure 2.13** : montre les différents composants de Microgrids.
- Figure 3.1** : Classification des batteries électrochimiques.
- Figure 3.2** : Batterie plomb-acide. Source: Le site Web du rajeunisseur de batterie
- Figure 3.3** : Croquis de SAFT Li-ion [31]
- Figure 3.4** : Schéma général convertisseur DC/DC
- Figure 3.5** : Configuration du convertisseur bidirectionnel DC/DC
- Figure 3.7** : Schéma du convertisseur abaisseur-élévateur
- Figure 3.8** : Capacité éolienne mondiale installée
- Figure 3.9** : Système d'énergie éolienne
- Figure 3.10** : Redresseur actif pour WT
- Figure 3.11** : Rapport entre le coefficient de puissance et la vitesse de pointe
- Figure 3.12** : Courbe de poursuite optimale des éoliennes
- Figure 3.13** : Commande pour WT
- Figure 2.13** : Montre les différents composants de Microgrids.
- Figure 3.1** : Classification des batteries électrochimiques.
- Figure 3.2** : Batterie plomb-acide. Source: Le site Web du rajeunisseur de batterie
- Figure 3.3** : Croquis de SAFT Li-ion [31]

- Figure 3.4** : Schéma général convertisseur DC/DC
- Figure 3.5** : Configuration du convertisseur bidirectionnel DC/DC
- Figure 3.7** : Schéma du convertisseur abaisseur-élévateur
- Figure 3.8** : Capacité éolienne mondiale installée
- Figure 3.9** : Système d'énergie éolienne
- Figure 3.10** : Redresseur actif pour WT
- Figure 3.11** : Rapport entre le coefficient de puissance et la vitesse de pointe
- Figure 3.12** : Courbe de poursuite optimale des éoliennes
- Figure 3.13** : Commande pour WT
- Figure 3.14** : Capacité solaire PV installée cumulée mondiale. Source : Agence internationale de l'énergie
- Figure 3.15** : Modèle de circuit équivalent pour un PV
- Figure 3.16** : Caractéristiques I-V du PV
- Figure 3.17** : Organigramme MPPT pour PV
- Figure 3.18** : Système d'énergie PV
- Figure 3.19** : Contrôle Booste dans le système PV
- Figure 3.20** : Micro-turbine à gaz [44]
- Figure 3.21** : Système énergétique GE
- Figure 3.22** : Circuit du convertisseur de suralimentation
- Figure 3.23** : Contrôle de boucle pour convertisseur élévateur
- Figure 3.24** : Commande PI pour convertisseur boosté
- Figure 4.1** : Mise en œuvre d'un micro-réseau DC par Simulink.
- Figure 4.2** : a) Puissance injectée par le TÉ en fonction b) de la vitesse du vent.
- Figure 4.3** : Commande de vitesse pour le modèle WT
- Figure 4.4** : Comparaison entre a) la puissance générée par le WT, b) l'erreur de vitesse.
- Figure 4.5** : Comparaison entre a) la puissance générée par le PV, b) la valeur d'éclairage énergétique.
- Figure 4.6** : Contrôle du mode PV MPPT. a) Comparaison entre dI/dV et I/V b) Erreur.
- Figure 4.7** : Flux de puissance dans le micro-réseau pour le Cas 1
- Figure 4.8** : Caractéristiques ESS : a) SOC, b) Tension.

- Figure 4.9** : Niveau de tension continue sur le micro-réseau pour le Cas 1
- Figure 4.10** : Flux de puissance dans le micro-réseau pour le Cas 2.
- Figure 4.11** : Niveau de tension CC pour le Cas 2.
- Figure 4.12** : Flux de courant dans le réseau pour le Cas 2.
- Figure 4.13** : Tension dans a) le côté AC de l'onduleur, b) la tension du réseau.
- Figure 4.14** : Niveau de bus de tension DC avec 3 unités Master
- Figure 4.15** : Flux de puissance dans la charge, PV et WT pour le cas 3.
- Figure 4.16** : Flux de puissance dans le GE et l'ESS pour le cas 3
- Figure 4.17** : Courant injecté par le PV et le WT pour le cas 3
- Figure 4.18** : Courant injecté par l'ESS et le GE pour le Cas 3
- Figure 4.19** : Niveau de tension CC pour chaque période de Master Control
- Figure 4.20** : Flux de puissance dans le micro-réseau pour le Cas4.

LES TABLEAUX

- Tableau 3.1** Paramètres typiques de la batterie LA
- Tableau 3.2** Liste des groupes Li-Ion, extraite de la page Web de la BatterieUniversit.
- Tableau 3.3** Systèmes d'énergie éolienne.
- Tableau 3.4** Fiche technique de l'éolienne.
- Tableau 3.5** Fiche technique PV
- Tableau 4.1** Cas d'étude implémentés par MATLAB/Simulink

LISTE DES ACRONYMES

AC	Courant alternatif (Alternative Current)
AIE	Agence internationale de l'énergie
BT	Basse tension
CHP	Chaleur et électricité combinées (Combined heat and electricity)
DC (CC)	Courant continu (Direct Current)
DER	Système énergétique distribué (Distributed Energy System)
DG	Génération distribuée (Distribute Genaration)
DOD	profondeur de décharge (Depth of discharge)
DOE	Département de l'Énergie (Department of Energy)
DS	Stockage distribué (Distributed storage)
DSP	Processeur de signal numérique (Digital Signal Processor)
Eg	Energie de gap
EMS	System de management de l'énergie (System Management Energy)
ES	Stockage d'Energie (Energy Storage)
ESS	Système de stockage d'énergie (Energy Storage System)
GPV	Générateur photovoltaïque
IEEE	Institut d'ingénieurs en électricité et électronique (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée (Isulated Gate Bipolar Transistor)
GE	Micro-turbine à gaz (Gas Engine)
LA	Plomb-acide (Lead-Acid)
Li-ion	Lithium
MG	Micro-réseau (MicroGrid)
MPPT	Suivi du point de puissance maximal (Maximun Power Point Tracking)
PI	Proportionnel-intégral (Proportional-Integral)
PMSG	Générateur synchrone à aimant permanent (Permanent Magnet Synchronous Generator)

PV	Photovoltaïque (Photovoltaic)
PWM	Modulation de largeur d'impulsion. (Pulse Width Modulation)
(MLI)	Modulation de largeur d'impulsion (Modulation de largeur d'impulsion)
SISO	Entrée unique Sortie unique (Single-Input Single-Output)
SOC	État de charge (State Of Charge)
TSR	Rapport de vitesse de pointe (Tip Speed Ratio)
U.S.	États-Unis (United States)
UPS	Alimentation sans interruption (Uninterruptible Power Supply)
VSC	Convertisseur de source de tension (Voltage Source Converter)
WAMS	Système de mesure de zone étendue (Wide Area Measurement System)
WT	Éolienne ou turbine à vent (Wind Turbine)

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables dans le monde au cours de la période entre 2004 et 2008 a augmenté d'une manière sans précédent. Au cours de cette période, la capacité de production totale d'énergie renouvelable a augmenté de 75%. Récemment, l'Agence internationale de l'énergie s'attendait à ce que l'année 2022 connaisse un nouveau record en termes d'augmentation de capacité dans le domaine des énergies électriques renouvelables, en particulier dans le domaine de l'énergie solaire en Chine et en Europe. La nouvelle infrastructure, des panneaux photovoltaïques à l'énergie éolienne en passant par les barrages, a atteint un niveau très évolué en 2021, car cette année a vu une capacité supplémentaire dans ce domaine qui a atteint 295 gigawatts.

Les micro-réseaux sont des écosystèmes énergétiques autosuffisants conçus pour relever les défis énergétiques du 21^{me} siècle. Un micro-réseau est un réseau énergétique local contrôlable qui dessert une entité géographique discrète telle qu'un campus universitaire, un complexe hospitalier, un centre d'affaires ou un quartier. Il se connecte au réseau en un point de couplage commun qui adopte la tension avec le réseau principal en temps normal et peut se déconnecter automatiquement ou manuellement et fonctionne comme un îlot en utilisant ses unités locales de production d'énergie en temps de crise. Le concept du micro-réseau suppose un groupe de charges et une combinaison d'unités de ressources énergétiques distribuées telles que des panneaux solaires, des éoliennes, la production combinée de chaleur et d'électricité, des systèmes de stockage d'énergies telles que des batteries et également des bornes de recharge pour les véhicules électriques. Les micro-réseaux contribuent à modifier la flexibilité, la fiabilité et la résilience, l'accessibilité à une énergie verte et sûre avec la possibilité de participer à des programmes de réponse à la demande, d'optimisation des coûts et d'équilibrage du réseau. Les micro-réseaux peuvent être classés selon différents aspects allant de la structure telle que CC, CA ou hybride au schéma de contrôle tel que centralisé, décentralisé ou distribué.

L'objectif de notre étude est identifier l'importance du contrôle intelligent du mini-réseau en faisant une simulation sur Matlab/Simulink.

De nos jours, les pertes dans les systèmes de distribution sont un problème évident, mais dans l'économie numérique moderne, la demande de qualité et de fiabilité de l'alimentation peut varier considérablement. Les clients commerciaux disposant de systèmes informatiques critiques exigent des niveaux élevés de qualité de l'alimentation et sont souvent prêts à payer pour cela, contrairement à la plupart des consommateurs résidentiels. Ceci est attesté par l'investissement dans l'alimentation sans coupure (UPS) par les clients commerciaux pour protéger les systèmes informatiques et de données contre les pannes.

Le mémoire présente un système étudié composé de deux générations renouvelables, de deux stockages d'énergie, de charges et d'unités de contrôle ; une unité de génération photovoltaïque (PV), une unité de génération d'éolienne (WT), une unité de stockage d'énergie par batterie, une unité de contrôle de puissance connectée au réseau AC et des charges DC. La taille du micro-réseau est déterminée sur la base de la charge et des générations renouvelables, les stockages d'énergie doivent pouvoir alimenter les charges DC lorsque les conditions météorologiques ne sont pas favorables aux générations PV et/ou éoliennes.

Pour mener à bien notre mémoire, nous allons répartir notre travail sur quatre principaux chapitres très bien détaillés pour aider le lecteur à comprendre l'intérêt du contrôle intelligent dans un micro-réseau.

Dans le premier chapitre, nous présenterons une revue générale sur les énergies renouvelables.

Le deuxième chapitre présentera clairement le micro-réseau ainsi que contrôle intelligent. On y trouvera les différentes définitions relatives, les types, l'architecture, les modes de fonctionnement, etc.

Le troisième chapitre, sera consacré essentiellement sur la modélisation et la commande des composants du micro-réseau.

Le quatrième et dernier chapitre sera dédié à la simulation et à l'étude de différents cas pour mieux comprendre l'objectif de notre mémoire.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui résumera notre étude.

CHAPITRE 01:

GÉNÉRALITÉ SUR LES

ÉNERGIES

RENOUVELABLES

1.1 Introduction

Une source d'énergie est renouvelable si le fait de la consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

Les chocs pétroliers successifs, depuis les années 70, ont démontré que les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposent sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties émergeant. Cependant, si l'option électronucléaire a suscité après son lancement de grands espoirs. Une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques conventionnelles dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle ; celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autre fois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité.

1.2 Définition

L'énergie renouvelable est l'énergie produite à partir de ressources naturelles. Les flux d'énergie renouvelable impliquent des phénomènes naturels tels que la lumière du soleil, le vent, les marées et la chaleur géothermique, comme l'explique l'Agence internationale de l'énergie (AIE) : « L'énergie renouvelable est dérivée de processus naturels qui se renouvellent constamment. Sous ses différentes formes, il provient directement du soleil ou de la chaleur générée au plus profond de la terre. Il comprend l'électricité et la chaleur générées par l'énergie solaire, éolienne, océanique, hydroélectrique, la biomasse, les ressources géothermiques et les biocarburants et l'hydrogène issus de ressources renouvelables » [1].

1.3 Les différents types des énergies renouvelables

1.3.1 La biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- ✓ Lors de 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 [2].

1.3.2 L'hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source à l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [3].

1.3.3 La géothermie

Dans le contexte des sciences pour l'ingénieur, le terme de « géothermie » regroupe des moyens de capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et de l'utiliser comme source de chaleur ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques.

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. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure [2].

1.3.4 L'hydrogène

L'hydrogène pourrait constituer un vecteur énergétique de l'avenir. En effet, d'une part les réserves de carburants fossiles ne sont pas éternelles et d'autre part on sait que le moteur à hydrogène est beaucoup plus respectueux de l'environnement que le moteur thermique, puisqu'il permet d'éviter les émanations de gaz carbonique et l'effet de serre. Le cœur du moteur à hydrogène est une pile à combustible qui fonctionne suivant le modèle d'une centrale électrique, avec un apport d'hydrogène et d'oxygène, l'oxygène étant prélevé directement dans l'air extérieur. Au contact chimique de l'oxygène, l'hydrogène produit de l'eau. Ce processus dégage de l'énergie sous forme d'électricité qui fait tourner le moteur [4].

1.3.5 Le solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW c/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [5].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique
- L'énergie solaire photovoltaïque
- L'énergie solaire passive

1.3.5.1 Energie solaire photovoltaïque

a. Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension I(V) non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [3].

b. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie. Si cette énergie est supérieur ou égale à l'énergie de gap (Eg) de ce semi-conducteur, l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction[6].

Si les photons ont une énergie très supérieure à Eg, ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons ont une énergie inférieure Eg ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

c. Cellules photovoltaïques ou photopiles [6]

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des composants électroniques à semi-conducteur qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Les matériaux les plus connus sont :

- le silicium (Si).
- le sulfure de cadmium (Cds).
- l'arséniure de gallium (As Ga).
- le tellure de cadmium (Cd Te).
- le germanium (Ge).
- le phosphore d'indium (InP).

Toutefois, le matériau le plus couramment utilisé est le silicium pur obtenu à partir de la silice (quartz ou sable) par transformations chimiques et métallurgiques [5].

d. Fonctionnement des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge.

Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique, nécessite [8]:

- Absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- Collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

e. Différents types des cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules :

a) Cellules mono- cristallines

Les cellules monocristallines qui s'approchent le plus du modèle théorique, est effectivement Composées d'un seul cristal divisé en deux couches [9].

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients:

- Première génération de photopiles [10].
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en labo.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

b) Cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et hétérogènes [7].

Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par [11] :

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.

c) Cellules amorphes

Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) [7].

- ✓ Coût de production bien plus bas.
- ✓ Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo.
- ✓ Fonctionne sous très faible éclairement [10].

1.3.6 L'éolienne

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement...

L'utilisation du vent par l'homme ne date pas d'aujourd'hui, elle est très ancienne. De nos jours

L'énergie mécanique du vent produit l'électricité. Le principe des éoliennes s'inspire de celui des moulins à vent et à eau autrefois utilisé pour moudre le grain ou pomper l'eau. L'éolien est l'une des énergies renouvelables les plus «prometteuses» à développer. Elle est intéressante d'un point de vue économique et environnemental. Pendant ces dernières années, l'éolien est très fortement développé, dans le monde et plus particulièrement en Europe. Les avancements technologiques dans ce domaine, ne cessent de progresser [12].

1.3.6.1 Constitution d'un système éolien

Le système de conversion éolienne est principalement constitué par :

- ✓ Une turbine éolienne avec ses annexes mécaniques dont le rôle est de convertir une partie de l'énergie du vent en énergie mécanique.
- ✓ Un générateur électrique qui transforme une partie de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre en énergie électrique.

- ✓ Une charge électrique qui peut être statique ou dynamique, ou un réseau de distribution d'énergie électrique.
- ✓ Une interface d'électronique de puissance, qui est en général placé entre le générateur et la charge, qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qui exige la charge.
- ✓ Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire, et éventuellement en régime dynamique [13].

1.3.6.2 Classification des éoliennes

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

❖ Taille des aérogénérateurs

Les besoins en énergie électrique conduit les chercheurs et les constructeurs à usiner des éoliennes de plus en plus puissantes ; la puissance de l'éolienne va avec la longueur des hélices. La classification des éoliennes selon leurs tailles se réduit à trois types, les éoliennes de petites tailles, de moyenne et de grande taille [14].

❖ L'organe capteur

Le but de l'organe capteur est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour des raisons de conversion d'énergie électromécanique, on cherche à obtenir un mouvement de rotation. Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [15].

a) Capteurs à axe horizontal

Toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal (c'est-à-dire un arbre principal horizontal). Leur principal avantage revient sur leur rendement très supérieur à celui des autres types [15,16].

b) Capteurs à axe verticale

Ce type d'éoliennes ne peut pas démarrer toute seule, Un système de lancement s'avère donc nécessaire. Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour [17].

❖ Principe de Fonctionnement

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

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [18].

1.3.7 Conclusion

A travers ce volet, nous avons donné l'essentiel concernant les énergies renouvelables.

CHAPITRE 02 :
MICRO RÉSEAU
ET
CONTRÔLE INTELLIGENT

2.1 Introduction

Il y a eu des initiatives mondiales pour la promotion de systèmes d'énergie renouvelable autosuffisants. Cette initiative a conduit au développement de systèmes de production d'énergie renouvelable capables de fournir une production d'électricité autosuffisante en utilisant plus d'une source d'énergie renouvelable.

Les énergies renouvelables hybrides les plus couramment utilisées sont les énergies solaire et éolienne. Ces deux sources d'énergie sont de nature intermittente; par conséquent, l'utilisation d'un système de stockage d'énergie (ESS) est standard dans les applications autonomes. Dans les systèmes hybrides d'énergie renouvelable, il existe plusieurs techniques de contrôle pour fournir un transfert d'énergie efficace.

Les applications les plus intéressantes de ces dernières décennies sont les micro-réseaux qui combinent des sources renouvelables et un système de stockage avec une puissance limitée. Ces systèmes sont contrôlés intelligemment ce qui a permis d'avoir un fonctionnement optimal.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude détaillée sur les micro-réseaux à l'échelle mondiale.

2.2 Définition du micro-réseau

Il y a un nombre important de définitions de micro-réseaux présentées dans des études publiées par des groupes de recherche du monde entier. Quelques descriptions de micro-réseaux peuvent être vues comme suit :

Le département américain de l'énergie (DOE) a publié une définition détaillée des micro-réseaux :

"Un MicroGrid, est un réseau énergétique local, offrant l'intégration de ressources énergétiques distribuées (DER) avec des charges élastiques locales et qui peuvent fonctionner en parallèle avec le réseau ou en mode îlot intentionnel pour fournir un niveau personnalisé de haute fiabilité et de résilience aux perturbations du réseau. ".

La définition des projets de recherche de l'UE serait la suivante :

Les MicroGrids comprennent des systèmes de distribution BT avec des ressources énergétiques distribuées (DER) (micro turbines, piles à combustible, PV, etc.) ainsi que des dispositifs de stockage (volants d'inertie, condensateurs d'énergie et batteries) et des charges. De tels systèmes peuvent être exploités de manière non autonome, s'ils sont interconnectés au réseau, ou de manière autonome, s'ils sont déconnectés du réseau principal. Le fonctionnement des MicroGrids dans le réseau peut apporter des avantages distincts à la performance globale du système, s'il est géré et coordonné efficacement.

Les MicroGrids sont de petits systèmes électriques contenant des sources d'énergie (génération distribuée), le stockage et les charges qu'ils peuvent faire fonctionner,

qu'ils soient connectés ou non au réseau principal AC (îloté mode). Ils maintiennent en temps réel l'équilibre de puissance entre consommation et production, principalement en gérant le stockage et en s'assurant que tous les états (variables pertinentes) sont conservés marges d'exploitation stables et à l'intérieur. Le concept de MicroGrid fournit une solution appropriée solution pour intégrer de plus en plus d'énergies renouvelables dans le réseau de distribution existant. En même temps, les MicroGrids peuvent fournir les charges locales et sensibles, puis cette fonctionnalité ainsi que la capacité de fonctionnement en mode îloté et connecté augmente la fiabilité du réseau électrique du point de vue des charges/clients [19].

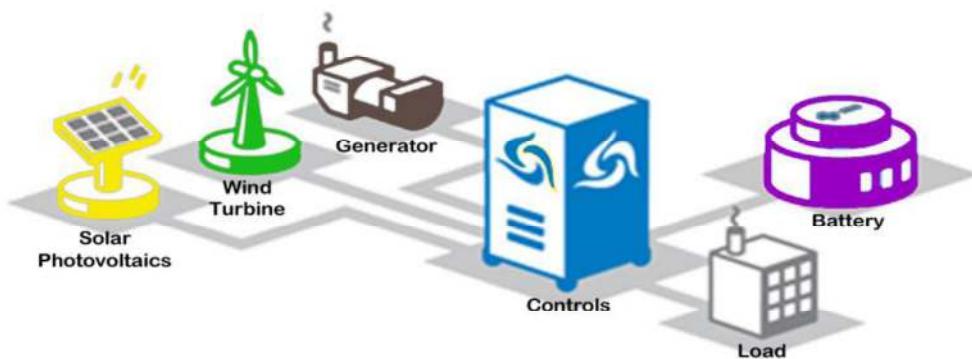


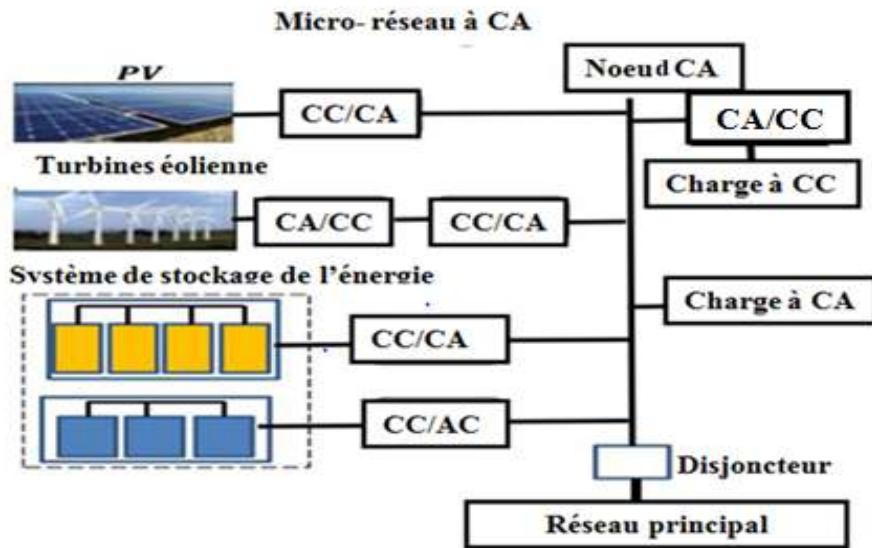
Figure 2.1:Schéma d'un MG.

2.3 Types de MicroGrid

Les MicroGrids peuvent être conçus en courant continu (CC) ou en courant alternatif (CA). Le réseau électrique CA est le choix traditionnel pour les systèmes énergétiques ; la transformation très facile de la tension alternative à différents niveaux, par exemple pour avoir une puissance de transmission sur une longue distance, facilite le déploiement du courant alternatif dans le monde depuis la fin du 19ème siècle. La pénétration des énergies renouvelables dans le système de production a changé ce statut dans ces dernières années.

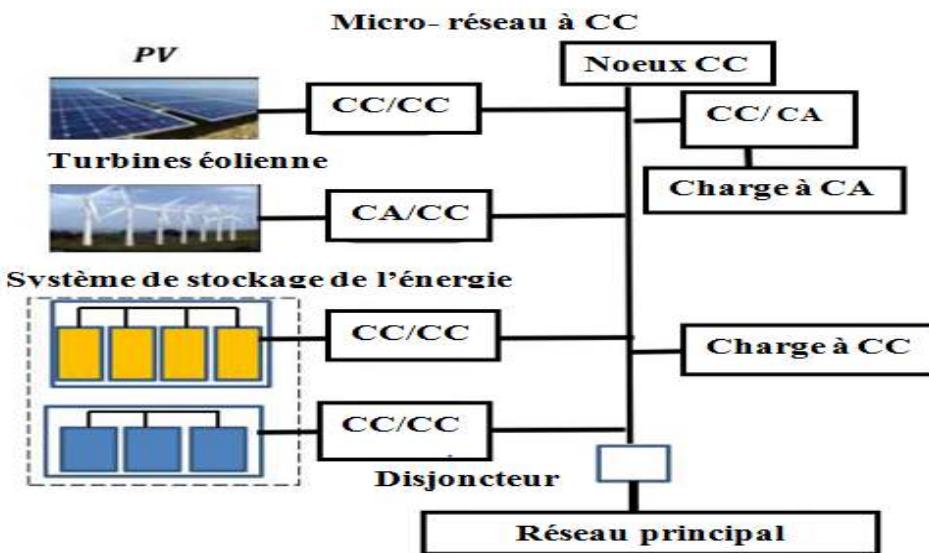
2.3.1 MicroGrid CA

La production d'énergie est connectée au bus CA commun via des convertisseurs de puissance. Alimentation CA La ligne de sortie peut fonctionner en mode connecté ou en mode îloté. Le schéma fonctionnel du MicroGrid AC est représenté sur la figure (2.2).

**Figure 2.2:** MicroGrid AC

2.3.2 MicroGrid CC

Les dispositifs de stockage d'énergie et la DG en tant que PV et piles à combustible produisent le courant continu qui est connecté au bus DC ; de nombreuses charges sont également en courant continu (leds), ou peuvent utiliser soit (chauffage).

**Figure 2.3:** CC Micro réseau

Le système DC MicroGrid est illustré à la figure (2.3). L'utilisation d'un bus DC dans MicroGrid peut éviter les pertes de puissance causées par la conversion de puissant.

2.3.3 Système de micro-réseau hybride CC/AC

La configuration du système hybride est illustrée à la figure (2.4). Les différents AC et CC sont connectés au bus CA et au bus CC correspondants. Le CA le bus et le bus CC sont reliés par des onduleurs et des transformateurs.

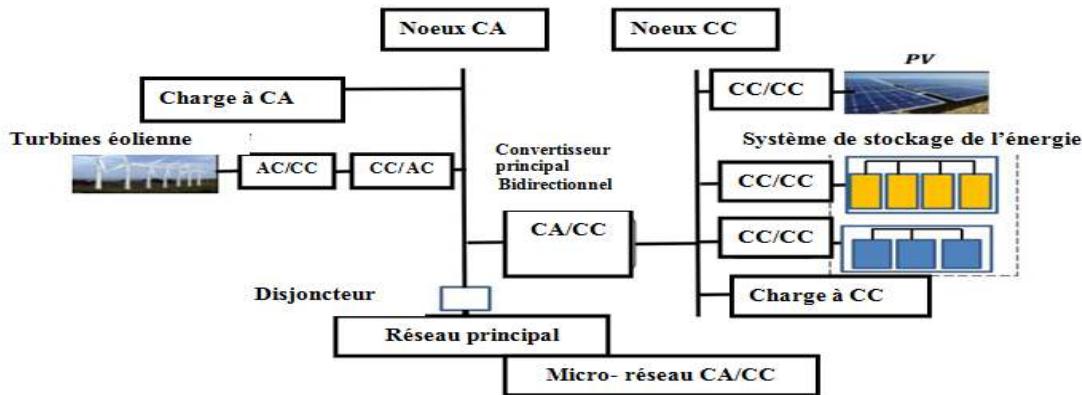


Figure 2.4 : Système de micro-réseau hybride CA/CC

2.4 Architecture de micro-réseau

Il y a de différentes architectures qui sont possibles pour les MicroGrids, nous passerons en revue quelques schémas de connexion communes qui ont été donnés dans la littérature dans ces dernières années.

2.4.1 Configuration de la grille radiale

La configuration radiale est la structure la plus utilisée [21, 22, 23] et peut être vue dans la figure (2.5).

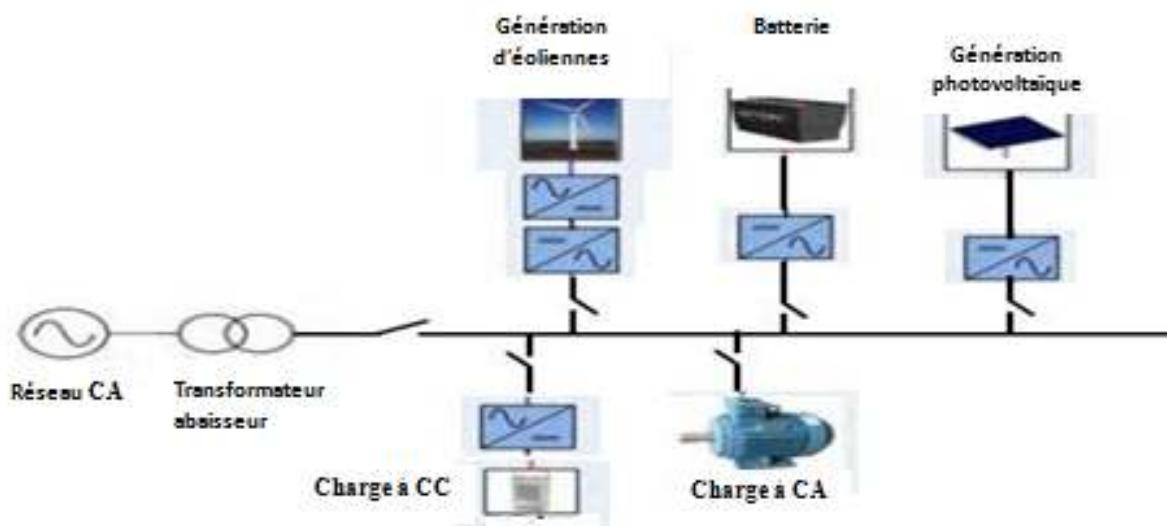


Figure 2.5 : Configuration du réseau radiale

Une configuration de réseau radial est basée sur une ligne principale (ou plusieurs lignes parallèles en temps réel). Auxquelles, les consommateurs d'électricité et la production sont connectés. Cette configuration est la plus simple et a l'avantage d'être techniquement la plus facile à mettre en œuvre, notamment en milieu rural [23].

2.4.2 Configuration du réseau bouclé

La configuration en anneau, figure (2.6), consiste en des lignes créant une boucle géométrique ou une forme d'anneau, permettant ainsi, deux itinéraires alternatifs pour le flux d'énergie vers un point donné du réseau [21,22, 23].

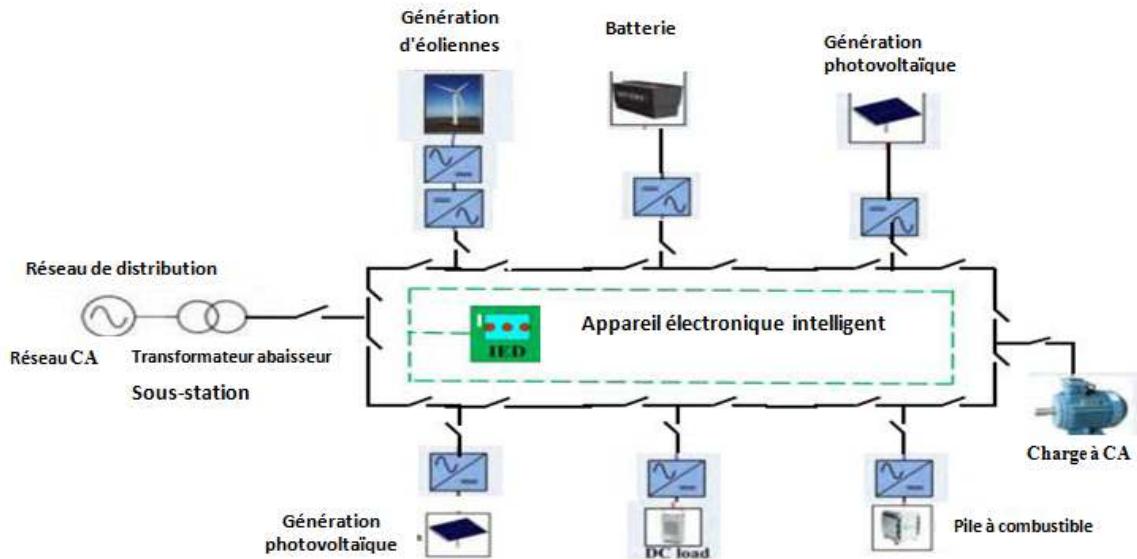


Figure 2.6 : Configurations d'un micro réseau bouclé

Cela offre une meilleure stabilité de tension et des pertes de puissances plus faibles, mais nécessite également un plus grand système de protection sophistiqué.

2.4.3 Configuration du micro réseau de type maillage

La figure (2.7) présente la configuration de maillage pour un MicroGrid

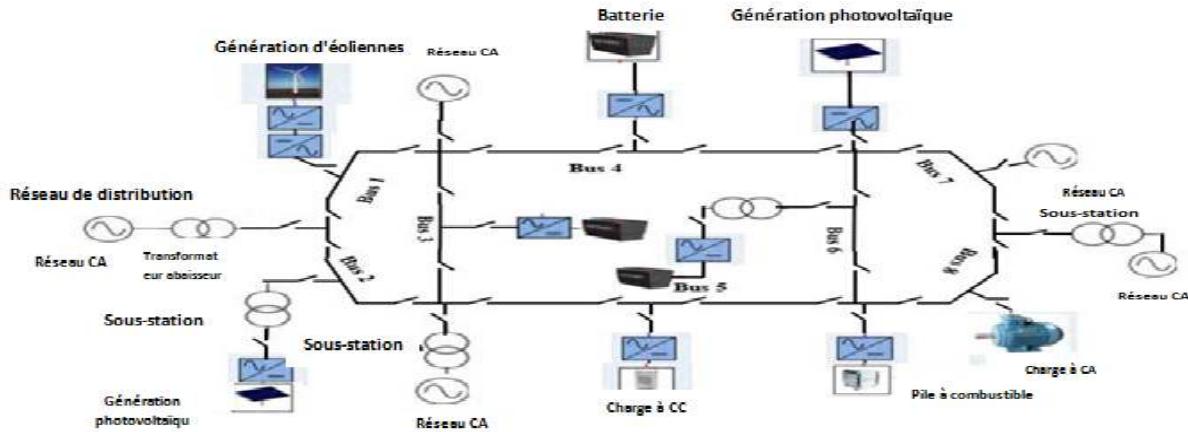


Figure 2.7 : Configurations du réseau MESH

La configuration maillée augmente encore la redondance en offrant plusieurs connexions alternatives à tous les nœuds du réseau. Il offre la plus grande flexibilité, mais rend également le fonctionnement et la protection du Micro réseau difficiles [21,22,23].

2.5 Modes de fonctionnement des MicroGrids

2.5.1 Mode îlot

Les MicroGrids en mode îlot, sont des MicroGrids isolés des autres réseaux de production d'électricité capables d'alimenter une seule installation ou plusieurs utilisateurs. Ils sont autosuffisants pour la production d'électricité mais ne peuvent pas fournir d'énergie excédentaire et, en cas de déficit, ne peuvent pas prélever d'électricité sur le réseau. Ces systèmes peuvent être situés dans des zones reculées, dans des zones où le réseau électrique local est très instable, ou dans des endroits où l'autosuffisance en électricité est essentielle.

2.5.2 Mode connecté au réseau

Les MicroGrids connectés sont directement reliés au réseau local de distribution d'électricité du pays. Ils ont l'avantage de pouvoir produire de l'électricité sur le réseau mais aussi de pouvoir recevoir de l'électricité du réseau électrique local. L'un des défis potentiels des micro-réseaux connectés au réseau local est que si le réseau électrique local tombe en panne, le MicroGrid peut également tomber en panne. Pour éviter ce risque, « Clarke Énergie » qui est une multinationale spécialisée dans les solutions de production d'énergie décentralisée apporte des considérations supplémentaires au

dispositif pour faciliter le basculement automatique d'une opération à l'autre et pour assurer le délestage afin que les charges connectées ne dépassent pas les capacités de production du micro-réseau.

2.5.3 Réseau connecté en mode îlot

Certains MicroGrids, tout en fonctionnant normalement en parallèle avec le réseau local, peuvent déconnecter l'alimentation entrante du réseau et fournir l'infrastructure électrique nécessaire, indépendamment du réseau. Pour ce faire, nous avons besoin de sources de production d'électricité capables de fonctionner indépendamment du réseau et indépendamment des profils climatiques.

2.6 Classification de contrôle du MicroGrid

Selon [24], les systèmes de contrôle MicroGrid peuvent être divisés en quatre types : Cadre centralisé, décentralisé, distribué et hiérarchique [24,19,25,26,28].

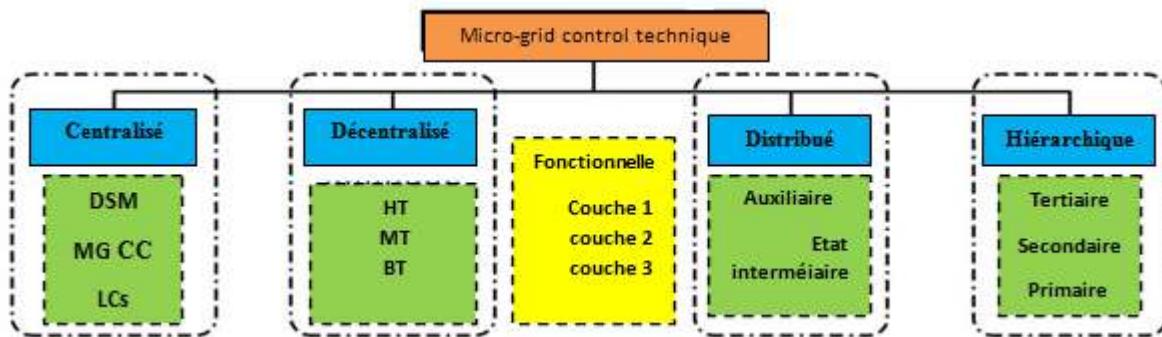


Figure 2.8: Classification des techniques de contrôle du MicroGrid et de la structure de la couche fonctionnelle

2.6.1 Contrôle centralisé

L'approche centralisée suggère que l'unité centrale collecte toutes les mesures et décide de l'action suivante pour un fonctionnement coordonné à l'intérieur de MicroGrid. Le but est de coordonner et de planifier les générateurs et la charge contrôlable afin de maximiser le revenu de la participation au marché de l'énergie [19], [24], [25].

2.6.2 Contrôle décentralisé

Dans l'approche décentralisée, il est suggéré d'utiliser les contrôleurs dans les nœuds distribués formant un système de contrôle distribué [19]. La méthode de contrôle décentralisé utilise des mesures locales et est basée sur des algorithmes intégrés dans chaque nœud, décidant des actions au niveau du composant [24].

2.6.3 Contrôle distribué

L'architecture de contrôle distribué est une version de la technique décentralisée, où chaque contrôleur local communique avec ses voisins pour obtenir certains avantages

de l'architecture centralisée destinée à l'ensemble de la MG. Cela signifie que chaque appareil est contrôlé en fonction des mesures locales tout en tenant compte de la réponse des voisins [24, 25].

2.6.4 Contrôle hiérarchique

La structure du contrôle hiérarchique est basée sur la différence d'échelles de temps de diverses exigences de contrôle. Les micro-réseaux fonctionnent en utilisant plusieurs boucles de contrôle [19,24, 25,27,28].

Les systèmes électriques nécessitent des stratégies de contrôle pour assurer leur bon fonctionnement. Les stratégies de contrôle doivent prendre en compte toutes les échelles de temps du système. Ceci est généralement effectué par une structure hiérarchique de contrôle des MG pouvant présenter trois niveaux de contrôle de la même structure du réseau AC : régulation primaire, régulation secondaire et régulation tertiaire. La figure (2.9) décrit la pyramide hiérarchique.

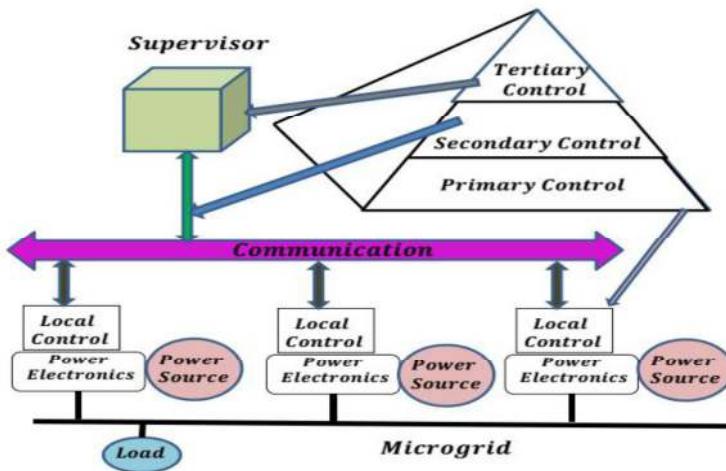


Figure 2.9 : Niveaux de contrôle hiérarchiques

Le contrôleur principal est responsable du contrôle de la tension locale et de la garantie d'un partage de puissances approprié entre plusieurs unités DG et un fonctionnement stable du MicroGrid. Les contrôleurs secondaires et tertiaires prennent en charge le fonctionnement du MicroGrid et incluent souvent le concept optimal, de communication et de prédiction, répondant à des objectifs multiples. Le contrôle primaire est une stratégie de contrôle local indépendant qui permet à chaque unité DG de fonctionner de manière autonome. Les contrôleurs primaires sont responsables de la fiabilité et de la stabilité du système. En raison de la dynamique rapide du MicroGrid, qui manque le plus souvent d'une quantité d'inertie de rotation, le contrôleur primaire doit être rapide, c'est-à-dire sur des échelles de temps de millisecondes. Ce contrôle principal local comprend le contrôle fondamental du matériel, et doit assurer la stabilité de la tension et du courant internes des DG (traditionnellement par des boucles de régulation), en mesurant et contrôlant les signaux locaux [19].

Dans la littérature [24,19], les contrôles primaires sont généralement classés comme suit : contrôle du statisme, contrôle de la tension et de la fréquence, partage de puissances active et réactive et enfin la gestion de l'énergie du système (EMS).

Le contrôle secondaire fournit le partage de puissances en tant que méthode basée sur la communication pour la configuration parallèle des DG et compense les écarts de tension et de fréquence causés par les variations de charge et le fonctionnement de la commande locale [19]. Le niveau de contrôle tertiaire et corrélé l'allocation de la réserve tertiaire est conçu pour optimiser le dispatching de l'énergie distribuée des ressources et pour assurer l'équilibrage de charge dans un réseau de distribution électrique local. On peut envisager l'optimisation qui peut inclure l'optimisation économique, technique et environnementale [29].

Ce contrôle tertiaire est chargé de coordonner le fonctionnement de plusieurs MicroGrids interagissent entre eux et échangent avec le réseau principal (pouvoir d'achat ou de vente, fourniture de services auxiliaires tels que le maintien de la tension et la régulation de la fréquence, etc.). Ce contrôle fonctionne généralement avec un pas de temps de l'ordre de quelques minutes à quelques heures, à condition que les signaux au niveau secondaire des MicroGrids et d'autres sous-systèmes forment le réseau complet.

Le contrôle secondaire, quant à lui, coordonne les contrôles primaires internes au sein du MicroGrids et sous-systèmes en l'espace de quelques minutes. Enfin, les contrôles primaires sont conçus pour fonctionner indépendamment et réagir de manière prédéfinie instantanément aux événements [25].

2.7 Classification des micros réseaux intelligents

Les projets de MicroGrids peuvent être classés en fonction de leur taille et également de leur utilité (fiabilité, résilience et efficacité des réseaux, difficulté d'accès à l'énergie, conditions météorologiques dégradées, émergence d'éco-quartiers, réflexion multi-énergie, économies d'énergie, etc.) en 5 grandes catégories:

2.7.1 MicroGrids des zones commerciales, artisanales ou industrielles

Ces zones, fortement consommatrices d'électricité, regroupent les entreprises et les industries aux activités diverses, dont les besoins en énergie ne sont pas tous identiques. Il s'agit d'y optimiser la gestion de l'énergie pour qu'elles soient plus neutres vis-à-vis du réseau de distribution.

2.7.2 MicroGrids de campus universitaire

L'enjeu est d'améliorer la gestion énergétique des campus dans un contexte où ceux-ci se doivent de réduire leur consommation d'énergie.

2.7.3. MicroGrids alimentant des zones isolées car faiblement ou non raccordées aux réseaux électriques ou temporairement coupées du réseau pour cause d'intempéries

Le déploiement des MicroGrids leur permet d'exploiter les ressources énergétiques renouvelables locales et de ne plus dépendre de groupes diesel polluants et coûteux. Les MicroGrids permettent également à des villes touchées par des intempéries d'éviter d'être totalement privées d'électricité ;

2.7.4 Eco quartiers

Ils fonctionnent peu ou prou sur le même modèle que les MicroGrids dans les zones commerciales ou industrielles ;

2.7.5 Micro réseaux de « base vie » (camp militaire ou hôpital)

Avec ses propres moyens de production et de stockage et ses propres infrastructures de distribution, le MicroGrid garantit une autonomie énergétique fournissant de l'électricité pendant les périodes de coupures de courant sur le réseau de distribution, atout essentiel pour les bases militaires ou les hôpitaux, qui ne peuvent pas laisser des pannes d'électricité les empêcher de s'acquitter de leurs missions. [21]

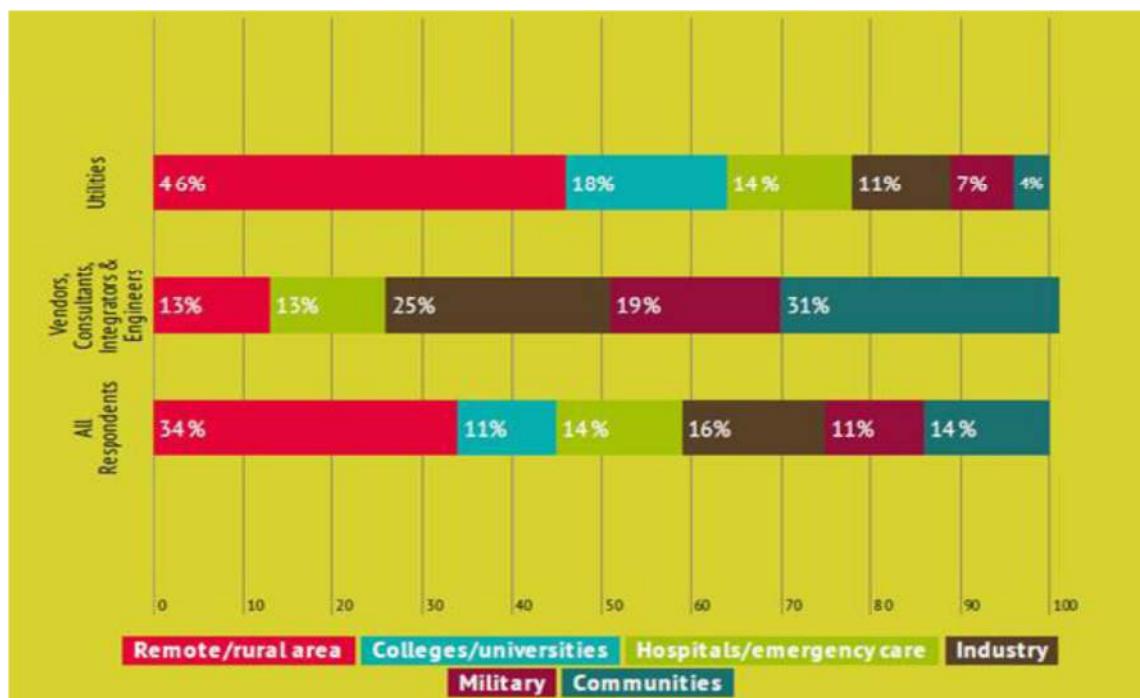


Figure 2.10: Classement MG

2.8 Défis techniques sur les MicroGrids

En tant que nouveau paradigme des systèmes électriques, la mise en œuvre des MicroGrids se heurte encore à de nombreux obstacles. Une moindre compréhension

des micro-réseaux et des politiques gouvernementales défavorables deviennent un obstacle à l'application de la technologie des micro-réseaux.

En général, en plus d'être appliquée comme solution à l'électricité dans les zones reculées, la technologie des MicroGrids peut également être utilisée comme solution électrique comme les complexes résidentiels urbains, les bureaux, les écoles et autres. Dans lequel, la mise en œuvre de la technologie des micro-réseaux offrira un avantage par rapport à la nécessité de construire un nouveau réseau de transmission et de distribution.

2.9 Technologies de micro-réseau

Le fonctionnement du système de micro-réseaux ne peut être séparé des technologies qui prennent en charge chaque partie qui compose le système de micro-réseaux, comme la source d'énergie (production distribuée), le stockage d'énergie, les commutateurs d'interconnexion et le système de contrôle des micro-réseaux. Les technologies de production de sources d'énergie distribuée comprennent l'utilisation de sources d'énergie renouvelables telles que le photovoltaïque, les éoliennes et les piles à combustible. Plusieurs systèmes d'alimentation améliorent l'efficacité en mettant en œuvre l'utilisation des gaz de combustion en utilisant la technologie CHP (chaleur et électricité combinées) comme micro turbine, Figure (2.11).



Figure 2.11:Micro turbine

Les technologies dans les systèmes de MicroGrids de stockage d'énergie incluent la batterie, le super condensateur et les volants d'inertie. Le stockage d'énergie dans le système de MicroGrid est utilisé entre autres pour :

- Stabiliser le système de MicroGrid face aux fluctuations des sources d'énergie et aux changements de charge.
- Permettre l'opération de partage de charge dans le système de MicroGrid.
- Réduire les pointes de charge et les interférences électriques

- Commuter les sources d'énergie de secours. La technologie d'interconnexion dans le système de MicroGrids utilise la technologie numérique en se servant d'un processeur de signal numérique (DSP) et équipé de dispositifs de communication, tout en respectant la norme d'interconnexion de réseau IEEE 1574. Pour améliorer la vitesse de réponse, le commutateur à semi-conducteur a utilisé des technologies telles que les thyristors, figure (2.12).

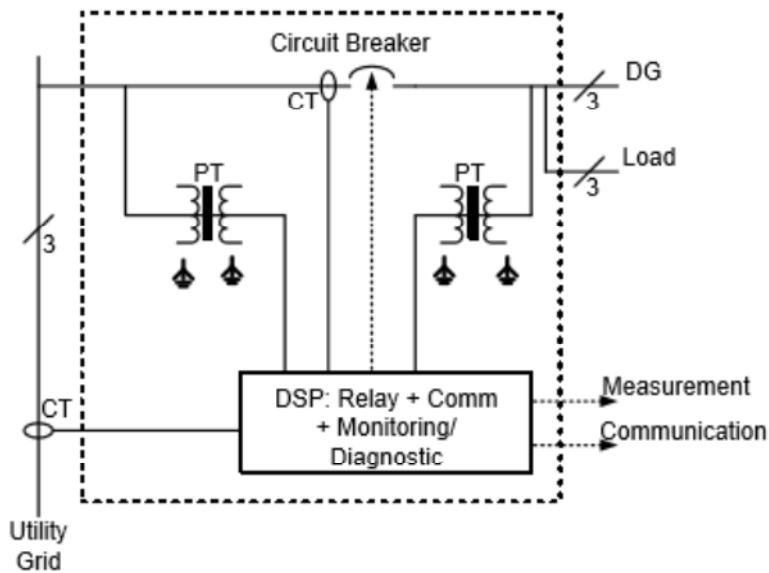


Figure 2.12: Un schéma de principe du disjoncteur sur la connexion au réseau

Les technologies de système de contrôle dans les micro-réseaux peuvent être regroupées en deux modes de fonctionnement qui sont connectés au mode réseau et au mode isolé (îlotage). Le système de contrôle est destiné à réguler la stabilité du fonctionnement du micro-réseau, en particulier en fréquence et en tension, afin de maintenir la stabilité face aux changements de charge et d'interconnexion avec d'autres réseaux. Le système de contrôle est appliqué à la technologie des convertisseurs de puissances dans la régulation des alimentations active et réactive, en appliquant le contrôle du statisme et le contrôle de la fréquence.

2.10 Composants d'un MicroGrid

Comme présenté ci-dessus, le MicroGrid est une combinaison d'unités de production distribuées, stockage, charges et connexion à d'autres réseaux (AC ou DC), connectés via un réseau, et géré par des méthodes de contrôle avancées pour opérer la distribution d'énergie (flux de puissances) et fournir des informations sur la consommation d'énergie.

Les micro-réseaux sont généralement composés :

- De production d'énergie distribuée sous forme de petites éoliennes, de panneaux photovoltaïques, de piles combustibles, de système de récupération d'énergie au

freinage, de moteurs à combustion interne avec générateurs et micro-turbines. Ces unités DG sont de petites sources d'énergie situées à proximité des clients.

- De stockage distribué qui comprend des dispositifs tels que des batteries, des super condensateurs, des volants d'inertie et des supraconducteurs.
- D'unités de stockage pouvant équilibrer les réserves allant du court terme au long terme
- D'Interfaces électroniques de puissances: les composants sont connectés en moyenne ou basse tension des réseaux par le biais d'interfaces d'électronique de puissances. L'interface de l'électronique de puissance pourrait contribuer à l'équilibre du pouvoir dans le système.
- De composants qui consomment de l'électricité.
- De contrôle et de communication : Ce système constitue le composant essentiel du MicroGrid, ils opèrent et contrôlent les unités DG avec les unités DS et les charges contrôlables. La présence de l'électronique de puissance avancée des capacités de conversion et de contrôle sont nécessaires pour intégrer la communication entre tous les composants dans un système de gestion MicroGrid coordonné.

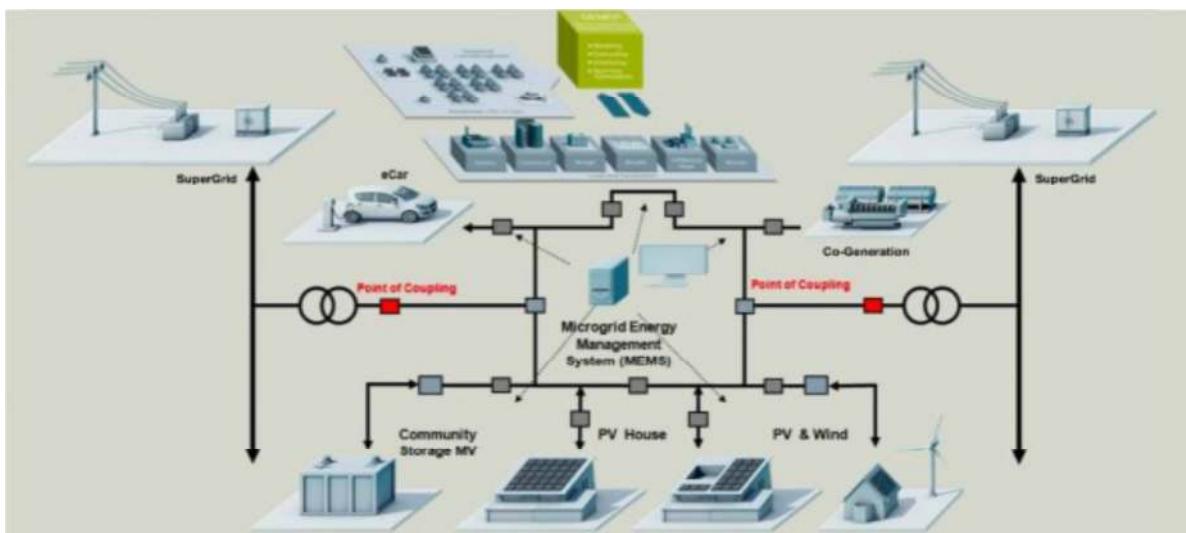


Figure 2.13: montre les différents composants de MicroGrids

2.11 Avantages d'un micro-réseau

Parmi les avantages d'un micro réseau, on peut citer :

- ✓ Le micro-réseau a la capacité, lors d'une perturbation du réseau électrique, de se séparer et de s'isoler du réseau électrique de manière transparente avec peu ou pas de perturbations des charges au sein du micro-réseau.
- ✓ Pendant les périodes de pointe, il peut prévenir les pannes du réseau électrique en réduisant la charge sur le réseau.
- ✓ Il présente des avantages environnementaux rendus possibles par l'utilisation de générateurs à émissions faibles ou nulles.

- ✓ Il vise à accroître l'efficacité énergétique. L'utilisation à la fois de l'électricité et de la chaleur est autorisée pour rapprocher le générateur de l'utilisateur.
- ✓ Il peut agir pour atténuer les coûts d'électricité de ses utilisateurs en générant une partie ou la totalité de ses besoins en électricité.

2.12 Inconvénients des micro-réseaux

On peut aussi donner quelques inconvénients d'un MicroGrid.

- ✓ On doit tenir en compte et contrôler les paramètres de tension, de fréquence et de qualité de l'alimentation selon des normes acceptables tout en maintenant l'équilibre de puissances et d'énergie.
- ✓ L'énergie électrique doit être stockée dans des bancs de batteries nécessitant ainsi plus d'espace et d'entretien.
- ✓ La difficulté de resynchronisation avec le réseau électrique.
- ✓ La protection d'un MicroGrid est l'un des défis les plus importants auxquels est confrontée la mise en œuvre des micro-réseaux.
- ✓ Des problèmes tels que les frais d'utilisation et la facturation nette peuvent constituer des obstacles pour le MicroGrid.
- ✓ Des normes d'interconnexion doivent être développées pour assurer la cohérence.

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail tout ce qui reporte sur le MicroGrid tout en donnant les différentes définitions relatives, les types ainsi que les composants essentiels qui le constituent.

CHAPITRE 03 :
MODÉLISATION ET
COMMANDÉE DES
COMPOSANTS DU MICRO
RÉSEAU

3.1 Introduction

Il est très important de souligner que le modèle mathématique de toute unité physique est indispensable sous condition de représenter exactement sa configuration réelle pour pouvoir simuler leur comportement en termes de leur analyse et de leur fonctionnement.

3.2 Stockages d'énergie

De nos jours, le stockage d'énergie est utilisé dans de nombreux domaines, mais bien sûr l'un des plus intéressants est en parallèle avec d'autres sources d'énergie pour obtenir des systèmes d'alimentation hybrides. Le stockage chimique et électrochimique représente une grande partie de l'ES, comme le montre la figure (3.1).

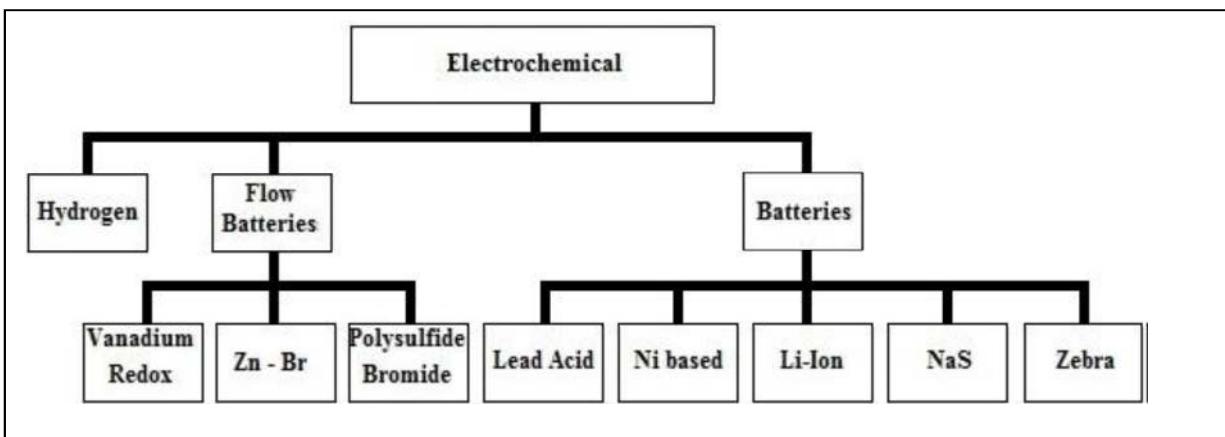


Figure 3.1: Classification des batteries électrochimiques [30]

Avant la description détaillée des batteries considérées, certains paramètres caractéristiques qui sont discutés dans les sections suivantes et s'appliquent aux différentes technologies doivent être définis pour plus de clarté :

- **Capacité de puissance :** correspond à la puissance de sortie instantanée maximale qu'un appareil ES peut fournir, généralement mesurée en kilowatts (kW) ou en mégawatts (MW).
- **Capacité énergétique :** c'est la quantité d'énergie électrique que l'appareil peut stocker, généralement mesurée en kilowattheures (kWh) ou en mégawattheures (MWh).
- **Temps de réponse :** c'est le temps qu'il faut au périphérique de stockage pour commencer à libérer de l'énergie à partir du moment où il est activé.
- **Efficacité :** indique la quantité d'électricité récupérable en pourcentage de l'électricité utilisée pour charger l'appareil.
- **Efficacité aller-retour :** indique la quantité d'électricité qui peut être récupérée en pourcentage de l'électricité utilisée pour charger et décharger l'appareil.

Dans cette thèse, deux modèles spécifiques de batteries sont choisis sur la base des plus utilisés dans le sujet, le Plomb-acide et le Li-Ion, qui seront expliqués ci-dessous.

3.2.1 Modèle A

A. Plomb-acide

C'est le dispositif de stockage d'énergie le plus couramment utilisé à l'heure actuelle. Son succès est dû à sa maturité, son coût relativement faible, sa longue durée de vie et sa rapidité de réponse. Ces batteries peuvent être utilisées pour des applications à court terme nécessitant un temps de décharge de l'ordre de quelques secondes, mais également pour des applications à long terme avec un temps de décharge de l'ordre de quelques heures.

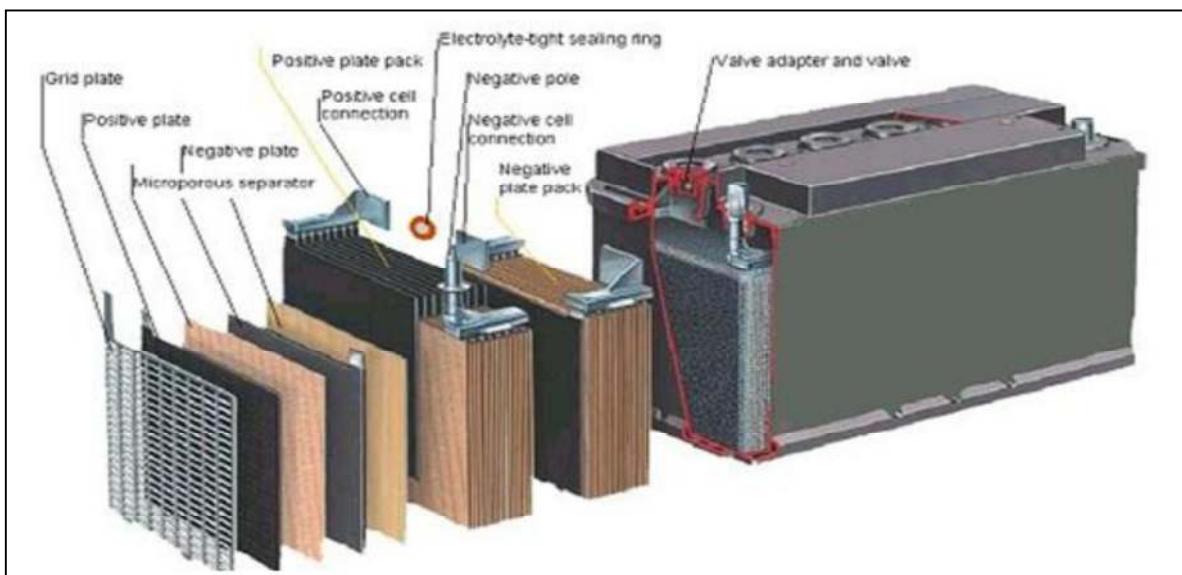


Figure 3.2 : Batterie plomb-acide. Source: Le site Web du rajeunisseur de batterie

Les batteries plomb-acide sont des cellules électrochimiques basées sur des réactions chimiques impliquant le plomb et l'acide sulfurique. Les capacités de puissance et d'énergie des batteries au plomb dépendent de la taille et de la géométrie des électrodes. La capacité de puissance peut être augmentée en augmentant la surface de chaque électrode, ce qui signifie de plus grandes quantités de plaques d'électrodes plus minces dans la batterie. Cependant, pour augmenter la capacité de stockage de la batterie, il faut augmenter la masse de chaque électrode, ce qui signifie des plaques moins nombreuses et plus épaisses. Par conséquent, un compromis doit être trouvé pour chaque application. Un ensemble de paramètres typiques de batterie LA peut être observé dans le tableau (3.1).

Tableau 3.1:Paramètres typiques de la batterie LA

Énergie spécifique	30-40 Wh/kg
Densité d'énergie	60-75 Wh/litre
Puissance spécifique	About 250 W/kg
Tension nominale de la cellule	2V
Efficacité électrique	Environ 80 %, selon le taux de recharge et la température
Taux de recharge	Environ 8 heures (possibilité de recharge rapide 90%)
Autodécharge	1-2% par jour
Durée de vie	Environ 800 cycles, selon la profondeur du cycle

➤ Avantages

Comme pour les autres types de batteries, les avantages les plus importants pour l'objectif de ce projet sont liés à la possibilité d'utiliser ce type de stockage d'énergie pour des applications à court et à long terme. Une autre caractéristique positive importante est le coût total qui est relativement faible en raison de sa maturité sur le marché.

➤ Inconvénients

Les batteries au plomb sont extrêmement sensibles à l'environnement, en particulier à la température. La température de fonctionnement typique est d'environ 27 °C, mais un changement de température de 5 °C ou plus peut réduire la durée de vie de la batterie de 50 %. La durée de vie de ce type de batteries est un point important. Cela dépend non seulement de la température mais aussi strictement du DOD (profondeur de décharge). Pour un DOD dans la plage de 2 à 5 %, la durée de vie en cycles de cette batterie est généralement égale à 1 000, avec un DOD profond, cette valeur diminue à 300-500 cycles. C'est le pire inconvénient de l'acide de plomb également parce que l'autodécharge atteint des valeurs d'environ 40% par an.

En raison de la haute densité des matériaux utilisés dans ces batteries, les densités d'énergie typiques sont faibles et l'efficacité, par rapport à d'autres types de stockage d'énergie, n'est pas si élevée.

Concernant l'impact sur l'environnement, le plomb est toxique et pour cette raison il doit être recyclé. De plus, l'acide sulfurique généralement utilisé comme électrolyte est corrosif et lorsqu'il est surchargé, la batterie génère de l'hydrogène qui présente un risque d'explosion.

➤ Applications

En raison de son faible coût, ce type de stockage d'énergie est essentiellement utilisé pour la qualité de l'alimentation, les onduleurs et certaines applications de réserve tournante. Théoriquement, il peut également être utilisé pour des applications à long terme comme la gestion de l'énergie, mais en réalité, cette application est limitée par la courte durée de vie de ces batteries.

3.2.2 Modèle B

B. Batterie au lithium (Li-ion)

Ce type de batterie est constitué d'une cathode formée d'un oxyde métallique lithié, d'un nœud anodique de carbone graphitique en structure stratifiée et d'un électrolyte constitué de lamelles de lithium dissous dans des carbonates organiques.

Lorsque le processus de charge a lieu, l'oxyde de lithium dans la cathode devient des ions lithium et migre à travers l'électrolyte vers l'anode où il se dépose sous forme d'atomes de lithium dans la couche de carbone. Le processus de décharge est inversé

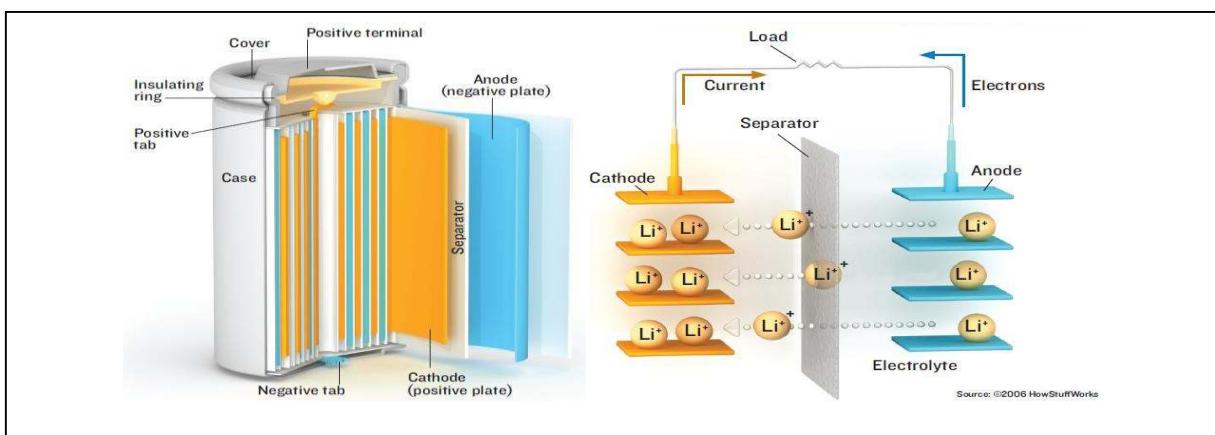


Figure 3.3: Croquis de SAFT Li-ion [31]

Il existe aujourd'hui principalement quatre groupes de batteries Li-ion différents qui sont reflétés dans le tableau (3.2).

Tableau 3.2: Liste des groupes Li-Ion, extraite de la page Web de la BatterieUniversité

Caractéristiques	Li-cobaltLiCoO ₂ (LCO)	Li-manganeseLiMn ₂ O ₄ (LMO)	Li-phosphateLiFePO ₄ (LFP)	NMC LiNiMnCoO ₂
Tension	3.60V	3.80V	3.30V	3.60/3.70V
Limite de frais	4.20V	4.20V	3.60V	4.20V
Cycle de vie	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000	1,000–2,000
Température de fonctionnement	Moyenne	Moyenne	Bien	Bien
Énergie spécifique	150–190Wh/kg	100–135Wh/kg	90–120Wh/kg	140-180Wh/kg
Puissance spécifique	1C	Impulsion 10C, 40C	35C continue	10C
Sécurité	Moyen. Nécessite un circuit de protection et un équilibrage des cellules du pack multi-cellules. Les exigences pour les petits formats avec 1 ou 2 cellules peuvent être assouplies		Très sûr, nécessite un équilibrage des cellules et une protection V	Plus sûr que Li-cobalt.
Thermique. Fuyez	150°C(302°F)	250°C(482°F)	270°C(518°F)	210°C(410°F)
Utilisé depuis	1994	1996	1999	2003
Chercheurs, industriels	Sony, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem Samsung Hitachi, Toshiba	Hitachi, Samsung, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem, Toshiba MoliEnergy, NEC	A123, Valence, GS Yuasa, BYD, JCI/Saft, Lishen	Sony, Sanyo, LG Chem, GS Yuasa, Hitachi Samsung
Remarques	Énergie spécifique très élevée, puissance limitée ; téléphones portables, ordinateurs portables	Puissance élevée, énergie spécifique bonne à éléver ; outils électriques, médicaux, véhicules électriques	Puissance élevée, énergie spécifique moyenne, autodécharge élevée	Énergie spécifique très élevée, puissance élevée ; outils, médical, véhicules électriques

➤ Avantages

Les principaux avantages de ce type de batterie électrochimique, par rapport aux autres types, consistent en une haute densité d'énergie, un très haut rendement et une longue durée de vie (3000 avec un DOD égal à 80%).

➤ Inconvénients

D'autre part, ces technologies de stockage d'énergie ont un coût élevé en raison de l'emballage spécial dont ces batteries ont besoin et également en raison du système de protection interne. Ce système est nécessaire car les batteries au lithium sont sensibles aux températures

excessives, à la surcharge et à l'augmentation de la pression à l'intérieur de la cellule électrochimique. Le coût est le principal défi de cette technologie.

➤ Applications

Actuellement, les principales applications compatibles avec cette technologie de stockage d'énergie se situent dans le domaine de la qualité de l'énergie ou de l'écrêtage des pointes de courte durée.

3.2.3 Contrôler

➤ Convertisseur DC/DC bidirectionnel

Les convertisseurs DC/DC sont des circuits qui ont en entrée et en sortie une tension continue de différentes valeurs. En réalité, la sortie est une valeur moyenne, et la figure (3.4) montre le schéma général de cette topologie de convertisseur.

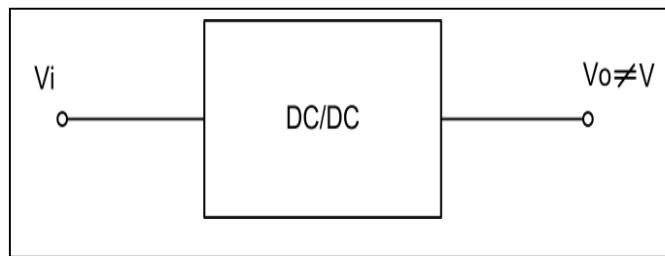


Figure 3.4:Schéma général convertisseur DC/DC

Le convertisseur spécifique utilisé avec les batteries a la configuration bidirectionnelle buck-boost. Il est capable de fonctionner comme un buck (abaisseur) lorsque la batterie a été chargée et comme un boost (step-up) dans le cas où la batterie a été déchargée. On l'appelle bidirectionnel pour signifier qu'il est capable de faire circuler le courant dans les deux sens, c'est-à-dire de la batterie au réseau et vice-versa.

La figure (3.5) montre le circuit du convertisseur utilisé, il fonctionne en deux modes. Mode chargé et mode décharge.

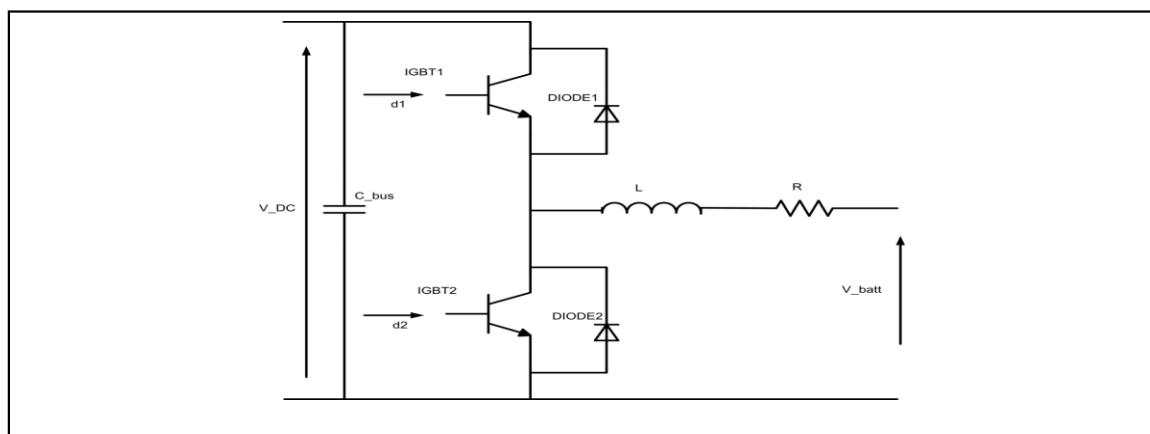


Figure 3.5: Configuration du convertisseur bidirectionnel DC/DC

En mode charge, l'IGBT1 supérieur est allumé et il est contrôlé par le signal PWM d, en même temps l'IGBT2 inférieur est éteint. Pendant ce temps, le convertisseur maintient le niveau de tension sur le micro-réseau à 800 V et il est capable d'alimenter la batterie jusqu'à ce qu'elle soit chargée.

En mode décharge, l'IGBT2 inférieur est allumé et il est contrôlé par le signal PWM d1, en même temps l'IGBT1 est éteint. Pendant ce temps, le convertisseur maintient le niveau de tension sur le micro-réseau à 800V, il est capable d'alimenter le DC- lien et la batterie se décharge.

Cette configuration de convertisseur est capable de fournir un courant négatif ou positif sur la base de décharge ou de charge de la batterie respectivement, tandis que le niveau de tension est toujours positif.

L'analyse du circuit du convertisseur permet de voir clairement qu'il est composé de deux hacheurs (IGBT/DIODE) correctement connectés. Le contrôle de ces deux IGBT est complémentaire, donc quand l'un est conduit l'autre est éteint, donc jamais le DC-link n'est affecté d'un court-circuit ($V_{DC} = 0$).

Le comportement du convertisseur pour enclencher les deux modes devrait être intéressant, pour que la batterie soit capable de se décharger la condition suivante est nécessaire :

$$V_m > 0, I_m > 0 \quad (3.1)$$

Donc, le hacheur supérieur fonctionne, dans l'autre sens la batterie est capable de se recharger dans ces conditions :

$$V_m > 0, I_m < 0 \quad (3.2)$$

Ainsi le hacheur inférieur fonctionne.

➤ Contrôle du convertisseur DC/DC

L'objectif du contrôle de l'ES est de maintenir constant le niveau de tension sur le circuit intermédiaire, c'est-à-dire sur le micro-réseau. Pour cela, deux circuits de contrôle de boucle sont implémentés, le premier pour contrôler la tension et le second pour contrôler le courant. Alors le contrôle suivant est mis en œuvre (figure (3.6)), où les boucles doivent effectuer le contrôle de la tension et du courant via les commandes PI.

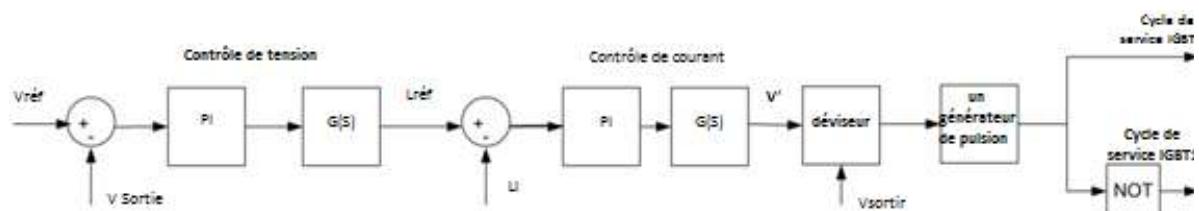


Figure 3.6: Schéma de contrôle du convertisseur

La première boucle permet d'avoir la valeur de tension moyenne sur le DC-link sur 800V, mais sans la deuxième boucle, les faibles oscillations sur la valeur de tension moyenne augmentent et le système sera instable.

Donc, pour avoir un système stable, la deuxième boucle est nécessaire, ainsi les oscillations sont supprimées et la tension sur la charge CC est maintenue constante.

Les valeurs de K_p et K_i sur les deux commandes PI sont calculées en tenant compte des fonctions de transfert $G_1(s)$ et $G_2(s)$ et en utilisant l'outil SISO dans MATLAB pour le circuit buck-boost suivant de la figure (3.7) en analyse de petits signaux.

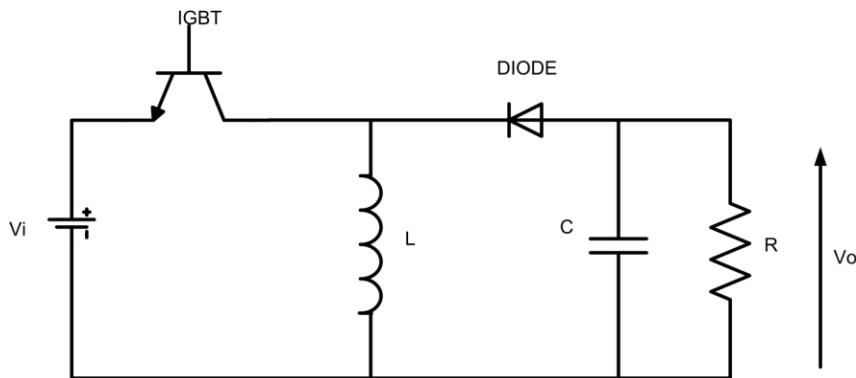


Figure 3.7: Schéma du convertisseur abaisseur-élévateur

Pour le convertisseur abaisseur-élévateur, les fonctions de transfert ligne-sortie $G_1(s)$ et commande-sortie $G_2(s)$ sont données à partir de la littérature [32][33] et elles sont calculées en suivant:

$$G_1(s) = \frac{V}{DD'} \frac{\left(1 - s \frac{DL}{D'^2R}\right)}{dem(s)} \quad (3.4)$$

$$G_1(s) = \frac{D}{D'} \frac{1}{dem(s)}$$

$$\text{Ou } dem(s) = 1 + S \frac{L}{D'^2R} + s^2 \frac{LC}{D'^2R}, \quad (3.5)$$

$$D = \frac{V_0}{V_0 - V_i} \text{ est le rapport cyclique et } D' = 1 - D'$$

3.3 Éolienne

L'une des sources d'énergie renouvelable qui se développe rapidement dans le monde est l'énergie éolienne; sa pénétration dans la production d'électricité va atteindre des pourcentages très élevés dans plusieurs pays. Sur la figure (3.8), il est possible de voir la capacité éolienne mondiale installée de 2005 à 2010.

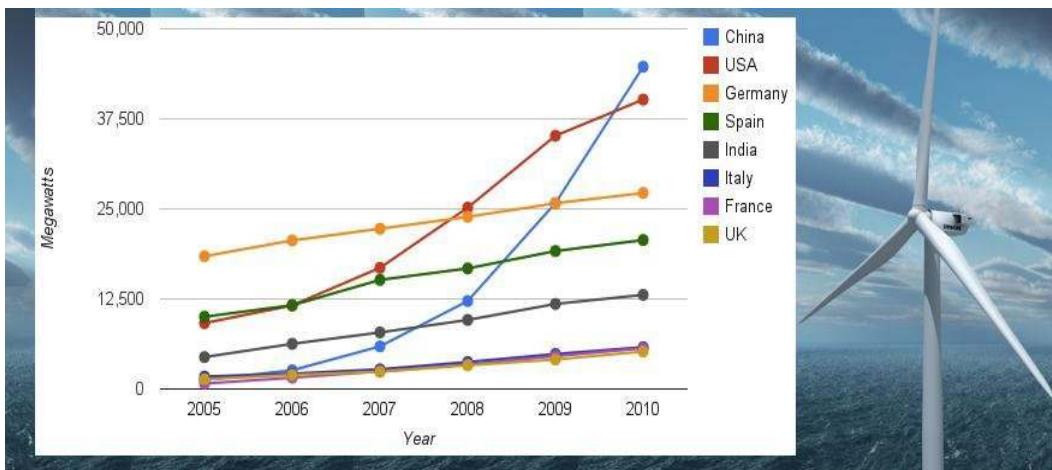


Figure 3.8: Capacité éolienne mondiale installée

Au cours des 30 dernières années, le développement des systèmes d'éoliennes a été étudié et de nos jours, les topologies d'éoliennes se sont multipliées. Les composants d'un système éolien peuvent être divisés en deux parties principales. Le premier est la section de puissance mécanique constituée de la conversion de puissance et de son contrôle et de sa transmission de puissance. Ces composants sont connectés à la deuxième section, le système d'alimentation électrique. La section de l'énergie électrique composée d'un générateur, d'un convertisseur de puissance, d'un transformateur de puissance et d'un réseau d'alimentation [34].

Différents systèmes génératrices sont utilisés pour l'éolienne, sur la base que l'éolienne fonctionne en vitesse fixe ou en vitesse variable. Le plus commun pour la vitesse fixe est le générateur à induction. Dans l'autre sens, pour la vitesse variable, d'autres topologies sont encore utilisées. Ces autres topologies sont : génératrice synchrone, génératrice synchrone multipolaire, génératrice synchrone à aimants permanents multipolaire, génératrice à induction à rotor blessé, génératrice à inductance doublement alimentée.

Certaines éoliennes utilisent un système électronique de puissance comme interfaces, c'est-à-dire qu'un système de convertisseur électronique de puissance est capable de permettre à la fréquence variable du générateur électrique d'être convertie en fréquence du réseau.

Compte tenu des différentes topologies de génératrices à vitesse fixe et variable et de la manière dont les systèmes électroniques de puissance sont utilisés, neuf systèmes éoliens différents sont répertoriés dans le tableau (3.3) suivant [34].

Tableau 3.3: Systèmes d'énergie éolienne [34]

Système	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
La rapidité	Fixé	Fixé	Fixé	Gamme limitée	Gamme limitée	Variable	Variable	Variable	Variable
Générateur	Induction	Induction	Induction	Rotor bobiné Induction	Induction à double alimentation	Induction	Synchrone	Multipolaire synchrone	Multipôles synchrone PM
Convertisseur de puissance	NON	NON	NON	Partiellement évalué	Partiellement évalué	Grandeur nature	Grandeur nature	Grandeur nature	Grandeur nature
Contrôle de la puissance aérodynamique	Terrain	Paralyser	Décrochage actif	Terrain	Terrain	Terrain	Terrain	Terrain	Terrain
Boîte de vitesses	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	NON	NON

3.3.1 Modèle

SYSTÈME "IX"

L'éolienne considérée dans cette mémoire est le modèle H12.0-50kW d'ANHUI HUMMER DYNAMO CO. Les caractéristiques sont présentées dans le tableau (3.4) suivant.

Tableau 3.4: Fiche technique de l'éolienne

Puissance nominale (kW)	50
Tension de sortie du système (Vac)	380
Vent de démarrage (m/s)	2
Vitesse nominale du vent (m/s)	11
Vitesse du vent de travail (m/s)	2-25
Taux d'utilisation de l'énergie éolienne (Cp)	0.49
Diamètre de la lame (m)	12

Étant donné qu'une petite éolienne est nécessaire pour mettre en œuvre le micro-réseau à courant continu, le meilleur choix est le générateur à aimant permanent sans boîte de vitesses qui fonctionne en vitesse variable [35].

L'utilisation de ce système peut augmenter la capture d'énergie du vent, améliorer l'efficacité et résoudre d'autres problèmes comme le bruit. Par exemple, lorsque la boîte de vitesses est utilisée dans le système d'éolienne, des coûts supplémentaires, des pertes de puissance, du bruit et un potentiel de défaillance mécanique peuvent causer des problèmes. De cette façon, l'utilisation d'un générateur synchrone à aimant permanent (PMSG) à vitesse variable pourrait être le meilleur choix [36].

Le modèle est composé du WT, du PMSG et, via un redresseur actif AC/DC, est connecté au micro-réseau DC, comme illustré à la figure (3.9).

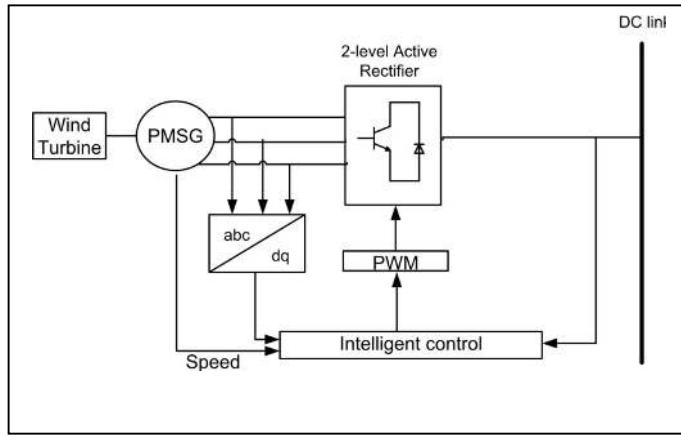


Figure 3.9: Système d'énergie éolienne

La puissance convertie par une éolienne est donnée par l'équation suivante [37] :

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho C_p A U_w^3 [W] \quad (3.6)$$

Où C_p est le coefficient de puissance qui est fonction du rapport de vitesse de pointe λ et de l'angle de pale β , il est représenté sur la figure avec un pas fixe, donc $\beta = 0$. Cette relation est généralement fournie par le fabricant sous la forme d'un ensemble sans courbes dimensionnelles. U_w est la vitesse du vent [m/s], A est la surface balayée par le rotor de l'éolienne [m^2] et ρ est la densité de l'air [$kg \cdot m^3$].

Le Tip Speed Ratio (TSR) est donné par :

$$\lambda = \frac{r \cdot \omega_m}{U_w} \quad (3.7)$$

Où r est le rayon du rotor [m], et ω_m est la vitesse angulaire mécanique du générateur [rad/s].

Les équations dynamiques du PMSG sont exprimées dans le référentiel « dq » par la transformation de Park, comme indiqué dans l'annexe A. Le modèle de dynamique électrique est donné par les équations suivantes en terme de tension et de courant, en supposant que le L'axe q est aligné avec le phasor de tension aux bornes du stator (c'est-à-dire $V_d = 0$) [38].

$$v_q = - (R + pL_q)i_q - \omega_r L_d i_d + \omega_r \emptyset_m \quad (3.8)$$

$$v_d = - (R + pL_d)i_d - \omega_r L_q i_q \quad (3.9)$$

Où R et L sont respectivement la résistance et l'inductance par phase, \emptyset_m est l'amplitude des liaisons de flux établies par l'aimant permanent, I_q et I_d sont les

courants de machine à deux axes, v_q et v_d sont les tensions de machine à deux axes, $\text{etp} = \frac{d}{dt}$

L'expression du couple électromagnétique dans le rotor est la suivante :

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [(L_q - L_d)i_q i_q - \emptyset_m i_q] \quad (3.10)$$

Où P est le nombre de pôles du PMSG, et T_e est le couple électrique du générateur.

La relation entre la vitesse angulaire mécanique du rotor ω_m et la fréquence angulaire du stator ω_r s'exprime comme suit :

$$\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m \quad (3.11)$$

Le coefficient de puissance dans cette approximation numérique attribuée par (Slootweg et al., 2003)[57] est donné par :

$$C_p == C_1 \cdot (C_2 \cdot \frac{1}{(\lambda + C_8 \theta_{pitch}) - \frac{C_9}{1 + \theta_{pitch}^3}} - C_3 \cdot \theta_{pitch} - C_4 \cdot (\theta_{pitch}^{C_5} - C_6) \cdot e^{(-C_7 \cdot \frac{1}{(\lambda + C_8 \theta_{pitch}) - \frac{C_9}{1 + \theta_{pitch}^3}})}) \quad (3.12)$$

Où de C_1 à C_9 sont les paramètres du WT donnés par le constructeur et θ_{pitch} est l'angle de tangage.

3.3.2 Contrôle-

➤ Redresseur actif

L'utilisation d'un redresseur actif (figure 3.10) comme convertisseur de source de tension (VSC) peut offrir certains avantages tels que la possibilité d'un contrôle total de la tension continue.

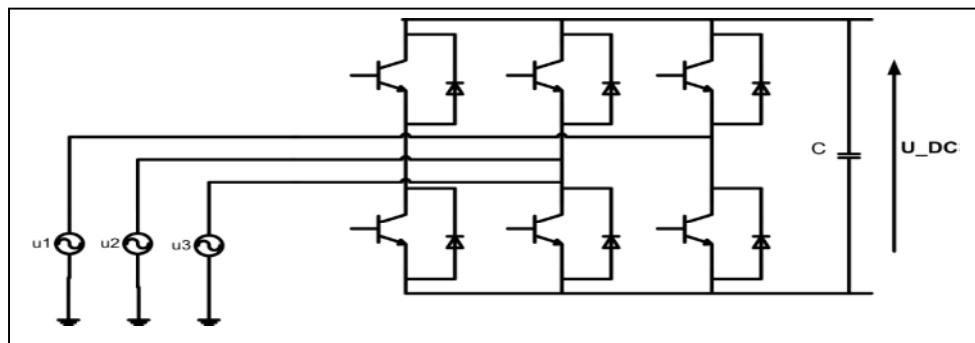


Figure 3.10: Redresseur actif pour WT

Le rapport des pales est fixe; la vitesse du vent dépend des conditions météorologiques, la seule variable contrôlable est donc la vitesse du rotor. La valeur

du TSR dépend de la vitesse du rotor et de la vitesse du vent, à partir de l'équation. Sur la figure (3.11), la relation entre le coefficient de puissance (C_p) et le TSR est représentée.

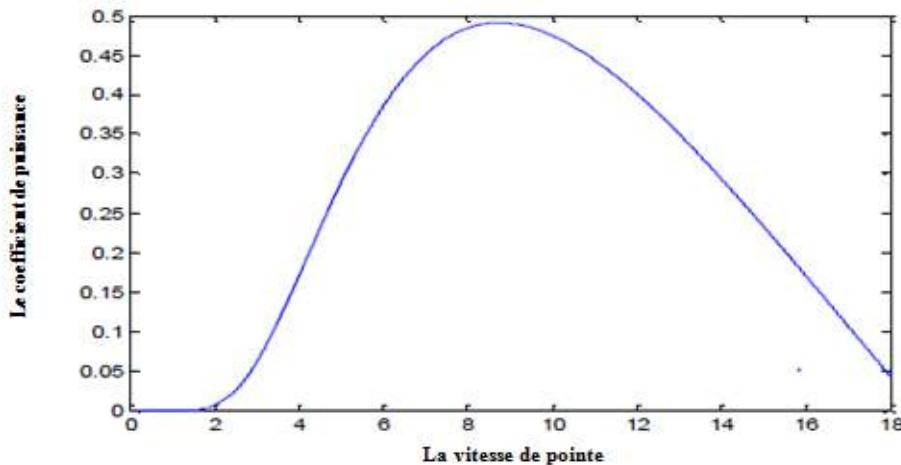


Figure 3.11: Rapport entre le coefficient de puissance et la vitesse de pointe

Le contrôle conçu pour les vitesses de vent inférieures à la vitesse nominale poursuit le fonctionnement WT au coefficient de puissance maximum, fixer des vitesses de rotation de référence proportionnelles à les vitesses du vent. Au lieu de cela, pour des vents plus forts, la méthode garantit la puissance nominale production comme indiqué dans la région plate de la courbe de suivi optimal de la figure (3.12).

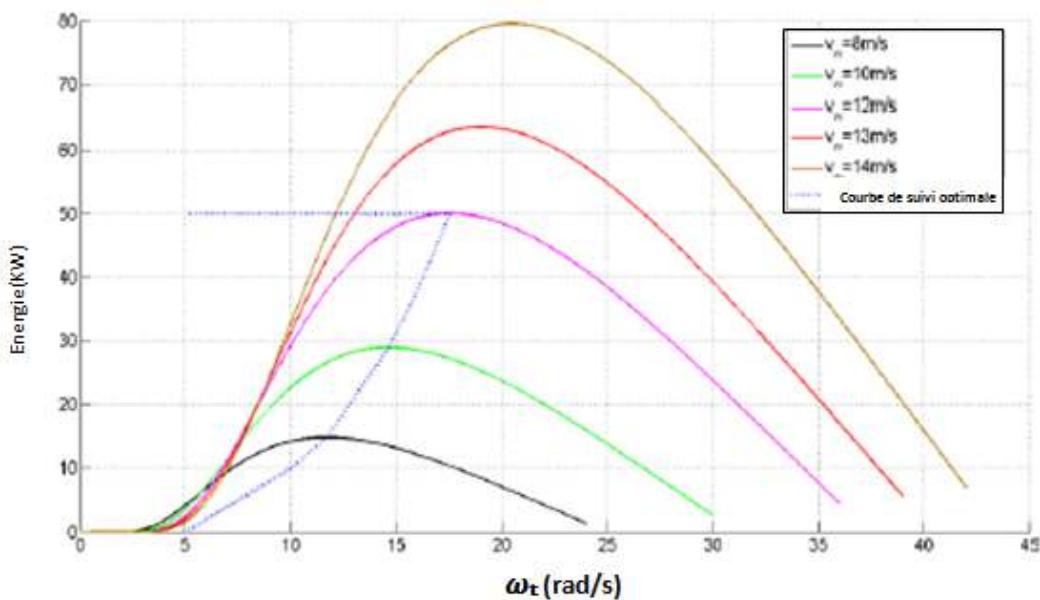


Figure 3.12: Courbe de poursuite optimale des éoliennes

Ceci est réalisé en fixant une vitesse de rotation de référence satisfaisant à la réduction appropriée du coefficient de puissance. Une telle régulation de vitesse est obtenue avec

un régulateur PI dans un extérieur boucle de vitesse appliquée à la commande de l'onduleur. Cela fonctionne avec des boucles internes contrôlant le courants machine transformés dans un référentiel tournant au PMSG électrique la rapidité. Une telle vitesse peut être facilement obtenue avec un encodeur et connu le nombre de pairs pôles de la machine. Le schéma de contrôle global est présenté à la figure (3.13).

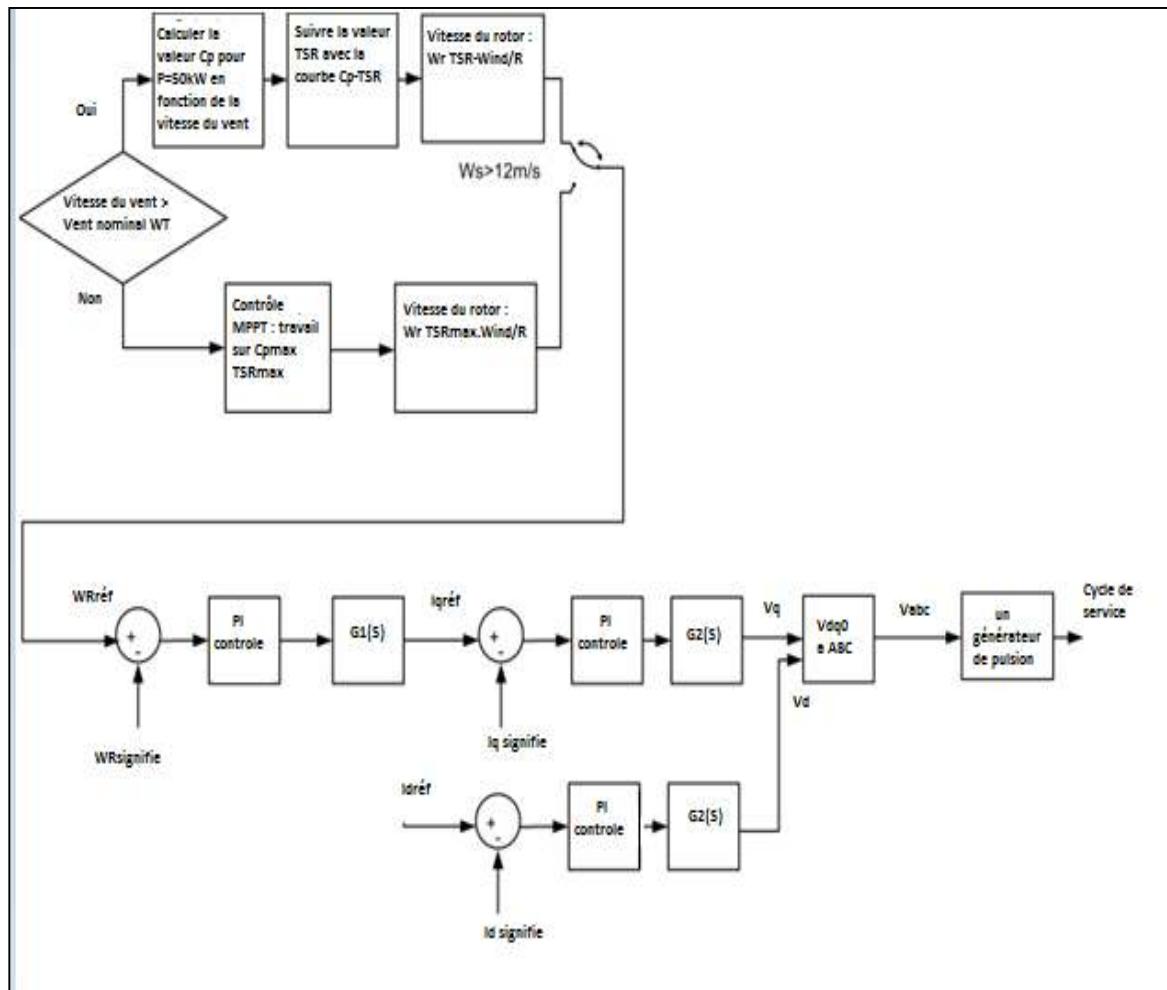


Figure 3.13: Commande pour WT

3.4 Photovoltaïque

Le PV se développe rapidement dans le monde; sa pénétration dans la production d'électricité va atteindre des pourcentages très élevés dans plusieurs pays, la figure (3.14) montre la capacité solaire PV installée cumulée mondiale

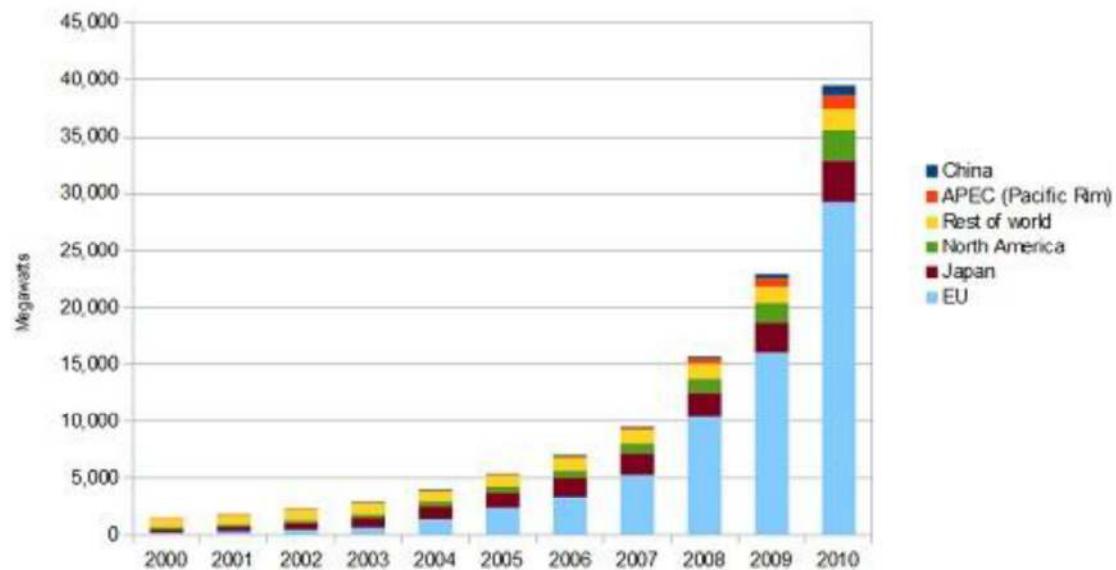


Figure 3.14: Capacité solaire PV installée cumulée mondiale. Source : Agence internationale de l'énergie

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs qui transforment l'irradiance solaire en courant continu, les types courants de cellules PV produites sont:[40]

- Cellules de silicium monocristallin
- Cellules de silicium multi cristallin
- Silicium à couche mince
- Silicium amorphe

Sur la figure (3.15), un modèle de circuit équivalent simplifié du PV est présenté. Le courant de sortie d'un module PV peut être obtenu à partir de l'équation ci-dessous,

$$I = I_{sc} - I_D - I_{Rp} = I_{sc} - I_0 \left[e^{q \frac{V + IR_s}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.13)$$

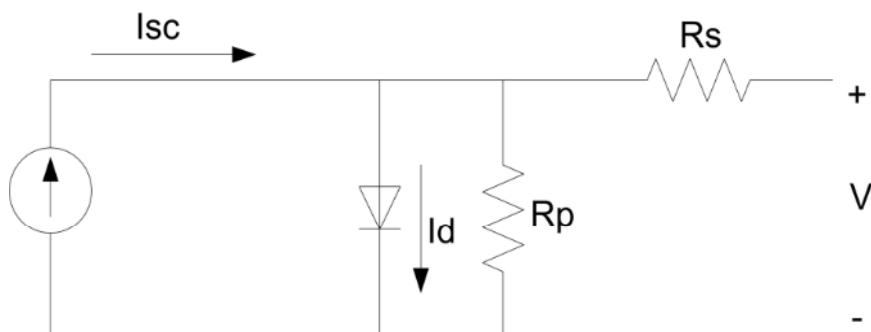


Figure 3.15: Modèle de circuit équivalent pour un PV

L'effet de la résistance parallèle (R_p) est très faible dans un seul module car sa valeur est proche de ∞ , il n'affecte donc pas la valeur du courant PV.

Habituellement, un générateur photovoltaïque se compose d'un groupe de modules photovoltaïques pour obtenir une puissance élevée. Ces modules d'un générateur photovoltaïque sont connectés en combinaisons série-parallèle [41]. Le courant de sortie, si R_p est considéré ∞ , d'un générateur photovoltaïque peut être obtenu à partir de l'équation:

$$I = N_p I_{sc} - N_p I_D = N_p I_{sc} - N_p I_0 \left[e^{q \frac{V+IR_s}{nN_s V_T}} - 1 \right] \quad (3.14)$$

Où N_p et N_s sont respectivement le nombre de cellules en parallèle et en série.

Les caractéristiques de courant par rapport à la tension et de puissance par rapport à la tension d'un générateur photovoltaïque sont similaires aux caractéristiques d'un seul module illustré à la figure (3.16).

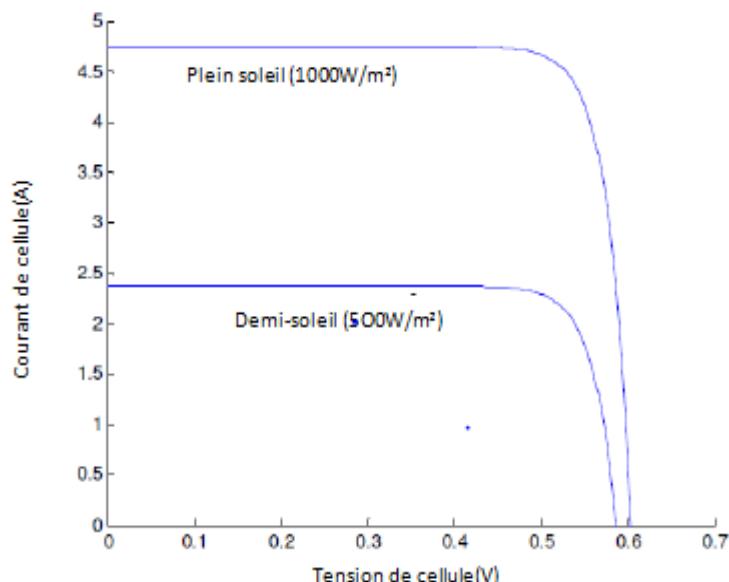


Figure 3.16: Caractéristiques I-V du PV

3.4.1 Modèle

Pour le générateur photovoltaïque, le modèle SX190W du fabricant BP Solaire a été choisi. Les paramètres sont indiqués dans le tableau (3.5) suivant :

Tableau 3.5: Fiche technique PV

Maximum Power (Pmax)	190W
Voltage at Pmax (Vmpppt)	24.3V
Current at Pmax(Imppt)	7.82A
Short-circuit current(Isc)	8.5A
Open-circuit voltage(Voc)	30.6V
Temperature coefficient of Isc	(0.065±0.015)%/°C
Temperature coefficient of Voc	-(111±10)mV/°C
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C
NOCT(Air20°C;Sun0.8kW/m ² ;wind1m/s)	47±2°C
Number of series connected modules	12
Number of parallel strings	11
Maximum Power	25Kw

Le modèle PV considéré dans cette mémoire est composé de 11 chaînes parallèles, chacune conçue par 12 modules connectés en série, pour une puissance nominale globale de 25kW. Le module de cellule PV agrégé est défini par un modèle à quatre paramètres

3.4.2 Contrôle

Le fonctionnement optimal du PV est assuré par l'algorithme MPPT (Incrémental Conductance Maximum Power Point tracking), adapté aux conditions d'éclairement changeant rapidement [42]. Il vise à "escalader" la courbe P-V typique en forme de colline, en poursuivant la condition de pente nulle :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3.15)$$

L'équation (4.30) tour à tour permet d'atteindre le point de puissance maximale (MPP) lorsque :

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{\substack{i=I_{MPP} \\ v=V_{MPP}}} = - \frac{I_{MPP}}{V_{MPP}} \quad (3.16)$$

Par conséquent, l'algorithme conçu dans [43] et illustré à la figure (3.17) est utilisé pour piloter le convertisseur élévateur reliant le système PV au micro-réseau CC.

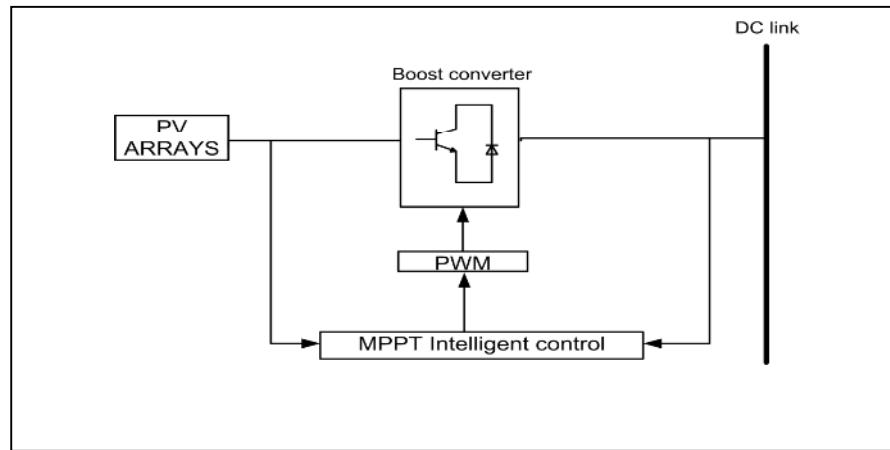


Figure 3.17: Organigramme MPPT pour PV

La figure (3.18) montre la configuration du système d'énergie PV, où il est possible de voir que les générateurs PV sont connectés au boîte DC-DC, l'analyse du modèle du convertisseur boîte DC-DC.

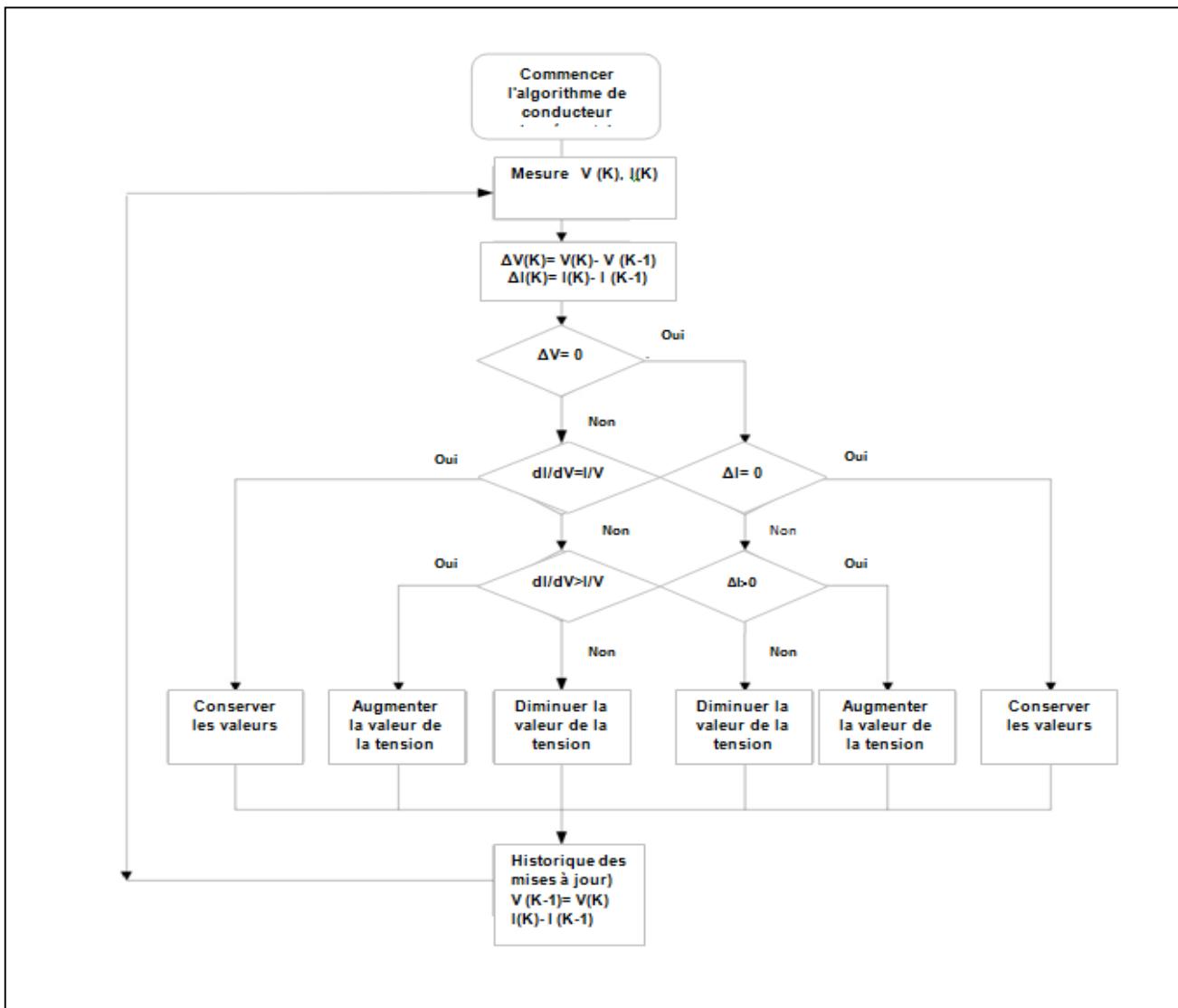


Figure 3.18: Système d'énergie PV

Le convertisseur est contrôlé par la mise en œuvre de l'algorithme MPPT tel qu'il est présenté dans la figure (3.19).

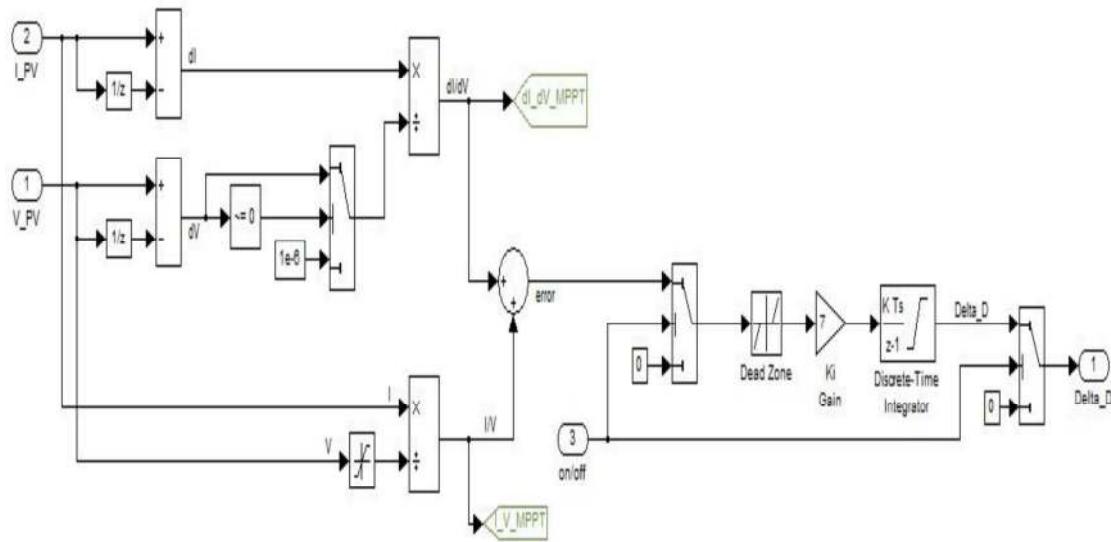


Figure 3.19: Contrôle Booste dans le système PV

3.5 Micro-turbine à gaz

La technologie de base des micro-turbines est dérivée des turbocompresseurs de moteurs diesel, des systèmes d'alimentation auxiliaires des avions et des conceptions automobiles [44]. Ses composants de base sont donc le compresseur, la chambre de combustion, le turbogénérateur et le récupérateur. Ici, la chaleur d'échappement est utilisée pour préchauffer l'air avant qu'il n'entre dans la chambre de combustion. La chambre de combustion mélange ensuite l'air chauffé avec le carburant et le brûle. Ce mélange se dilate à travers la turbine, qui entraîne le compresseur et le générateur. L'air brûlé est ensuite évacué par le récupérateur avant d'être rejeté à la sortie d'évacuation [45]. Un exemple de ces unités est illustré dans la figure (3.20) suivante, où il est possible de voir le générateur de micro-turbine C30 de Capstone.

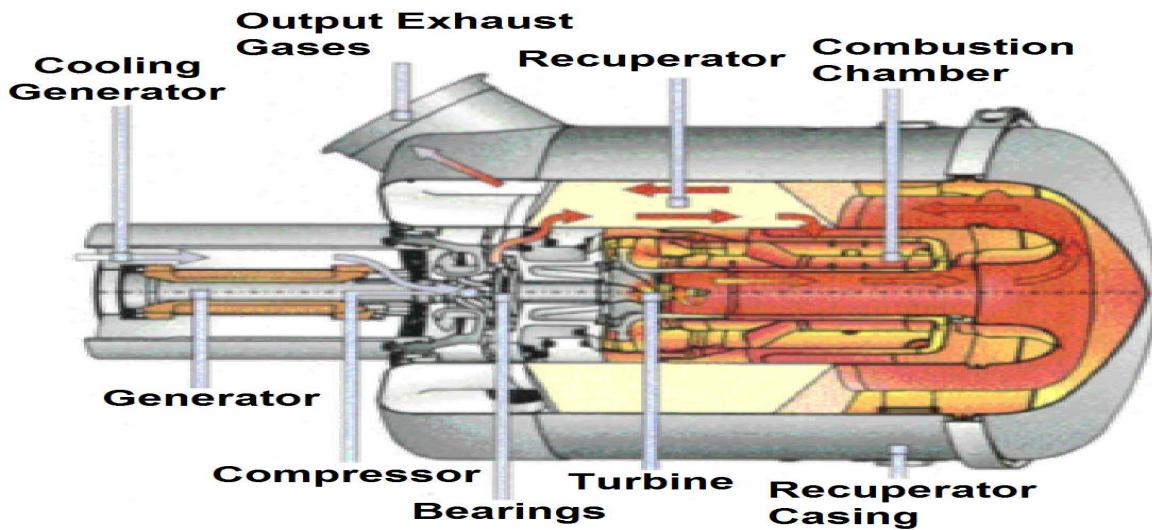


Figure 3.20: Micro-turbine à gaz [44]

Selon la figure 3.21, la micro-turbine à gaz est composée d'un moteur à gaz. Dans cette étude, nous allons considérer les modèles de (GE), du PMSG, du pont universel et du convertisseur élévateur pour les connecter au micro-réseau DC. L'utilisation de ce système peut augmenter la capture d'énergie du gaz.

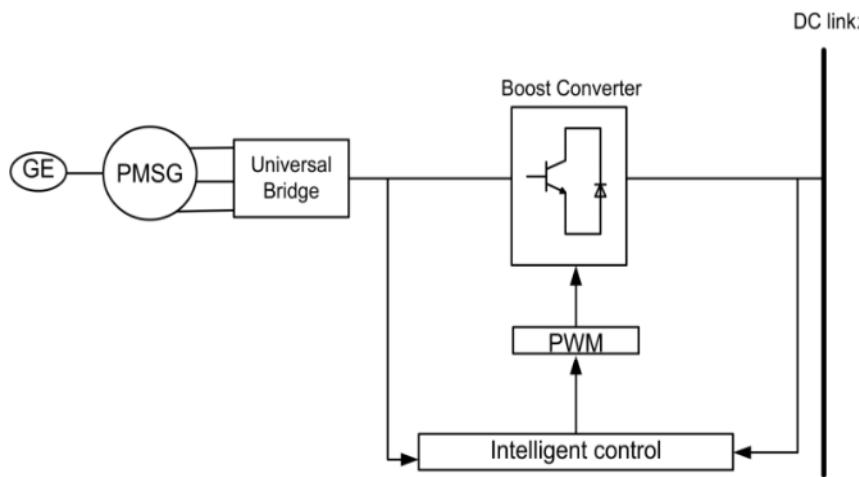


Figure 3.21: Système énergétique GE

Le GE est connecté au PMSG avec la puissance de sortie de 40kW, l'efficacité du moteur à gaz est supposée de 31% et l'efficacité du PMSG est de 97%, donc en connaissant les valeurs calorifiques inférieures pour le gaz naturel PCI= 35889,3 kJ/m³ de l'Agence internationale de l'énergie en Norvège, il est possible de calculer combien de gaz le moteur a besoin pour produire une puissance d'environ 41,237 kW puisque 1[Ws]= 1[J]. À partir de l'annexe D :

- La quantité de gaz en une heure est de 13,34 m³
- La quantité de gaz en une journée est de 320,16 m³

3.5.1 Contrôle

➤ Convertisseur élévateur DC/DC

L'unité PV considérée dans ce travail donne une valeur de tension de sortie inférieure au micro-réseau DC requis. Par conséquent, le niveau de tension doit être augmenté et le convertisseur doit fonctionner en mode boosté.

La figure (3.22) montre le schéma du convertisseur élévateur avec un flux de puissance de gauche à droite, les composants principaux sont l'inductance L, le condensateur de sortie C, le commutateur IGBT, la diode et la charge R.

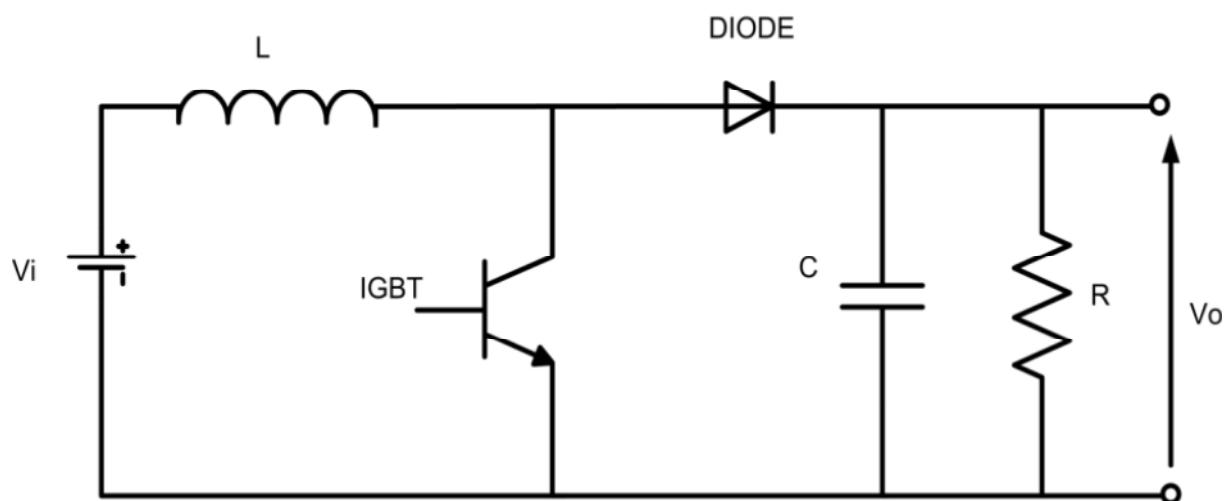


Figure 3.22: Circuit du convertisseur de suralimentation

Dans les littératures [32,33], il est possible de trouver une analyse mathématique complète du convertisseur boosté, par conséquent, dans cette section, seules les formules les plus pertinentes sont présentées.

La tension dans le condensateur :

$$v_c = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \quad (3.17)$$

Où i_c est calculé puisque la relation entre i_0 et i_L

Le courant traversant l'inductance vaut :

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} V_L dt \quad (3.18)$$

Où v_L est égal à v_0 pendant T_{on} et $v_L = v_1 - v_0$ pendant T_{off} .

La relation de conversion de tension en CCM pour le convertisseur élévateur est :

$$v_0 = v_i \frac{1}{1 - D} \quad (3.19)$$

En considérant les valeurs moyennes, la relation entre le courant d'inductance et le courant de sortie, travaillant toujours en CCM pour le convertisseur boosté est :

$$i_L = i_0 \frac{1}{1 - D} \quad (3.20)$$

Donc entre le courant de sortie et le courant d'entrée, la relation sera :

$$i_0 = i_1(1 - D) \quad (3.21)$$

➤ Contrôle du convertisseur Booste

Le schéma de commande du convertisseur est présenté à la figure (3.23). Le convertisseur CC/CC est connecté à l'onduleur et doit maintenir la tension d'entrée de l'onduleur à la tension souhaitée. La commande implémente une boucle de courant interne rapide et une boucle externe plus lente pour régler la tension continue.

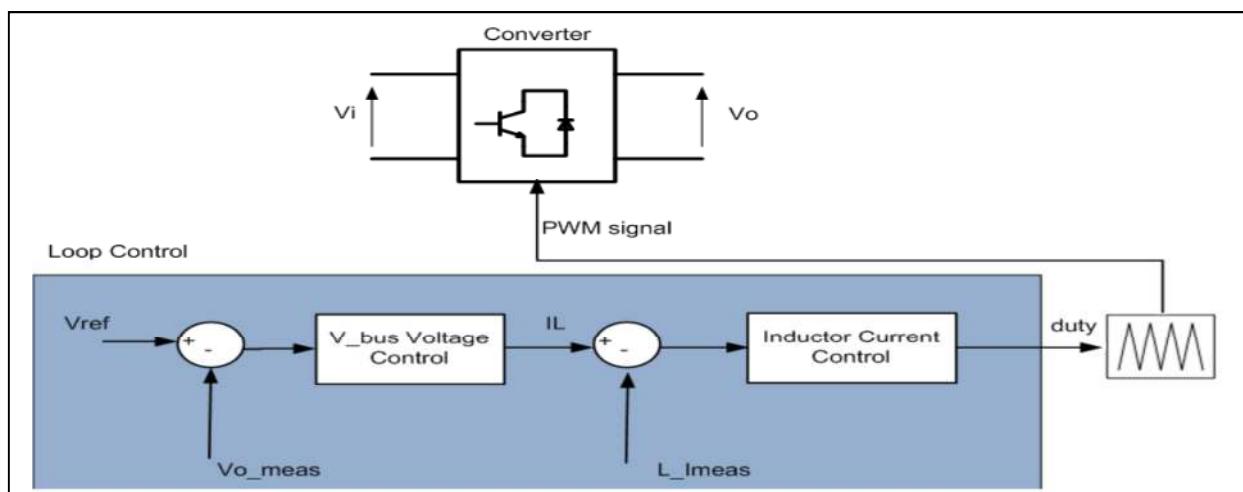


Figure 3.23: Contrôle de boucle pour convertisseur élévateur

Les contrôleurs PI standard sont mis en œuvre pour l'ensemble du bloc de contrôle, ce qui donne la structure de contrôle globale décrite à la figure (3.24).

Le système contrôle la tension continue en envoyant des références à une boucle de contrôle de tension externe qui génère une référence de courant d'inductance, qui génère une valeur de rapport cyclique, pour la génération de signal PWM.

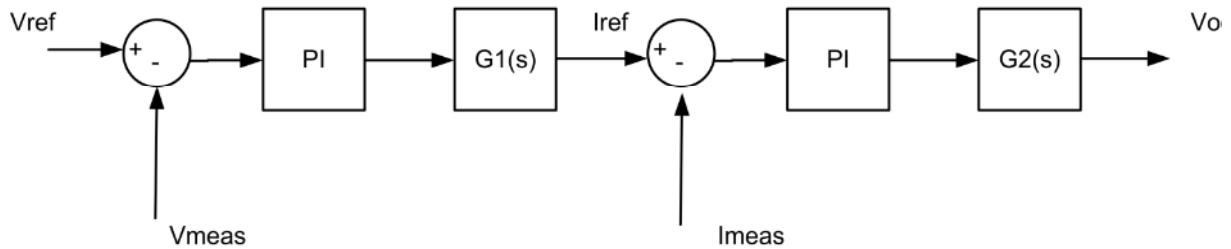


Figure3.24:Commande PI pour convertisseur boosté

Les tensions d'entrée V_i sont inférieures à la sortie, elles doivent donc être augmentées pour avoir la tension de sortie V_0 requise via un circuit de suralimentation contrôlé.

Le circuit de la figure (3.22) est analysé pour trouver les fonctions de transfert $G_2(s)$. Le système doit être étudié sur deux intervalles, l'intervalle 1 est DT_s et l'intervalle 2 est $(1-D)T_s$, il est supposé sans perturbations

$$\text{Intervalle 1} \begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = v_1 \\ C_0 \frac{dv_0}{dt} = -\frac{v_0}{R} \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\text{Intervalle 2} \begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = v_1 - v_0 \\ C_0 \frac{dv_0}{dt} = i_L - \frac{v_0}{R} \end{cases} \quad (3.23)$$

Les équations d'état moyennes sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = (v_1 - v_0) - (1 - D) \quad (3.24)$$

$$C_0 \frac{dv_0}{dt} = -\frac{v_0}{R} D + (i_L - \frac{v_0}{R})(1 - D) = i_L(1 - D) \quad (3.25)$$

Le modèle petit signal

$$L \frac{d\tilde{i}_L}{dt} = (\tilde{v}_1 + V_0 \tilde{d}) - (1 - D)v_0 \tilde{d} - (1 - D)\tilde{v}_0 \quad (3.26)$$

$$C_0 \frac{d\tilde{v}_0}{dt} = I_L \tilde{d} - (1 - D)\tilde{i}_L - \frac{\tilde{v}_0}{R} \quad (3.27)$$

La fonction de transfert

$$L_s I_L(s) = V_1(s) + V_0 D(s) - (1 - D)V_0(s) \quad (3.28)$$

$$V_0(s) = \frac{R(1 - D)}{CRs + 1} I_L - \frac{RI_L}{CRs + 1} D(s) \quad (3.29)$$

Pour $V_1(s)=0$ la relation entre le rapport cyclique et le courant d'inductance est :

$$L_s I_L(s) = V_0 D(s) - (1 - D)V_0(s) = V_0 D(s) - (1 - D) \left[\frac{R(1 - D)}{CRs + 1} I_L - \frac{RI_L}{CRs + 1} D(s) \right] \quad (3.30)$$

$$\frac{I_L(s)}{D(s)} = \frac{V_0 CRs + V_0 + (1 - D)RI_L}{CLRS^2 + Ls + R(1 - D)^2} \quad (3.31)$$

$$I_L = \frac{V_0}{R} \frac{1}{(1 - D)} \quad (3.32)$$

$$G_2 = \frac{I_L(s)}{D(s)} = V_0 \frac{2 + CRs}{CLRS^2 + Ls + R(1 - D)^2} \quad (3.33)$$

De la même manière, la fonction de transfert pour la boucle externe est :

$$G_1 = \frac{V_0}{I_L(s)} = V_0 \cdot \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} \cdot \frac{1}{D} \quad (3.34)$$

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation et le contrôle des composants du micro-réseau, nous avons également donné une explication approfondie des éléments les plus importants ainsi que les différentes options pour notre étude, que nous évoquerons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 04 :

SIMULATIONS ET ÉTUDE

DE CAS

4.1 Introduction

L'objectif des études de cas de simulation est de vérifier que le modèle de simulation de micro-réseau proposé peut fonctionner dans différents modes avec une forte pénétration du DER, et d'analyser les performances du système dans différents scénarios. Le modèle mis en œuvre du micro-réseau DC est illustré à la figure (4.1).

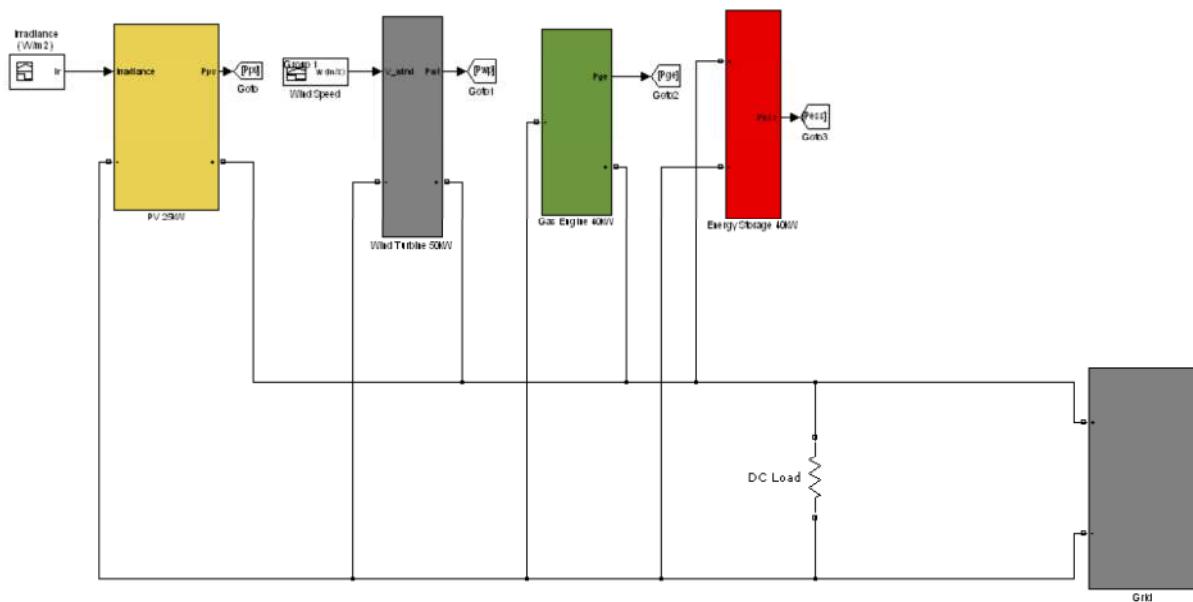


Figure 4.1: Mise en œuvre d'un micro-réseau DC par Simulink.

Quatre cas d'étude ont été mis en œuvre dans l'environnement MATLAB/Simulink et dans ce chapitre, les résultats seront présentés. Le tableau (4.1) montre les différents cas d'étude.

Tableau 4.1: Cas d'étude implémentés par MATLAB/Simulink.

Cas 1	Mode îloté
Cas 2	Mode connecté au réseau
Cas 3	Trois unités Maîtres fonctionnement
Cas 4	Défauts en cascade

4.2 Cas 1

Dans le premier cas, le micro-réseau est mis en œuvre pour fonctionner en mode îloté, où l'ESS agit en tant que "maître", pour contrôler le niveau de tension sur le bus DC et pour équilibrer le flux de puissances. Dans ce scénario, l'entrée du PV est la fluctuation de l'irradiance et l'entrée du WT est la variation de la vitesse du vent et dans les deux unités, les méthodes MPPT.

Sur la figure 4.2, la puissance fournie par la source WT et la vitesse du vent sont indiquées. Dans cette première simulation, la vitesse du vent commence à 10 m/s et

augmente jusqu'à arriver à la valeur de vitesse nominale de 12 m/s au temps 1.5s. Lorsque le vent atteint les 13m/s au temps 3s, il commence à diminuer jusqu'à 8,5 m/s au temps 9s. Dans la fluctuation de puissance, la puissance augmente à 0,5 (en même temps que la vitesse du vent augmente de 10 m/s), jusqu'à arriver à la puissance nominale à 1,5 s. La puissance reste à 50kW jusqu'à 4.5s (lorsque la vitesse du vent est inférieure à 12 m/s). Après 4,5s la puissance diminue jusqu'à arriver à 18,5kW au temps 9s. Le contrôle de la vitesse du WT sera montré pour souligner les deux régimes transitoires qui se produisent à 1,5 s et 4,5 s.

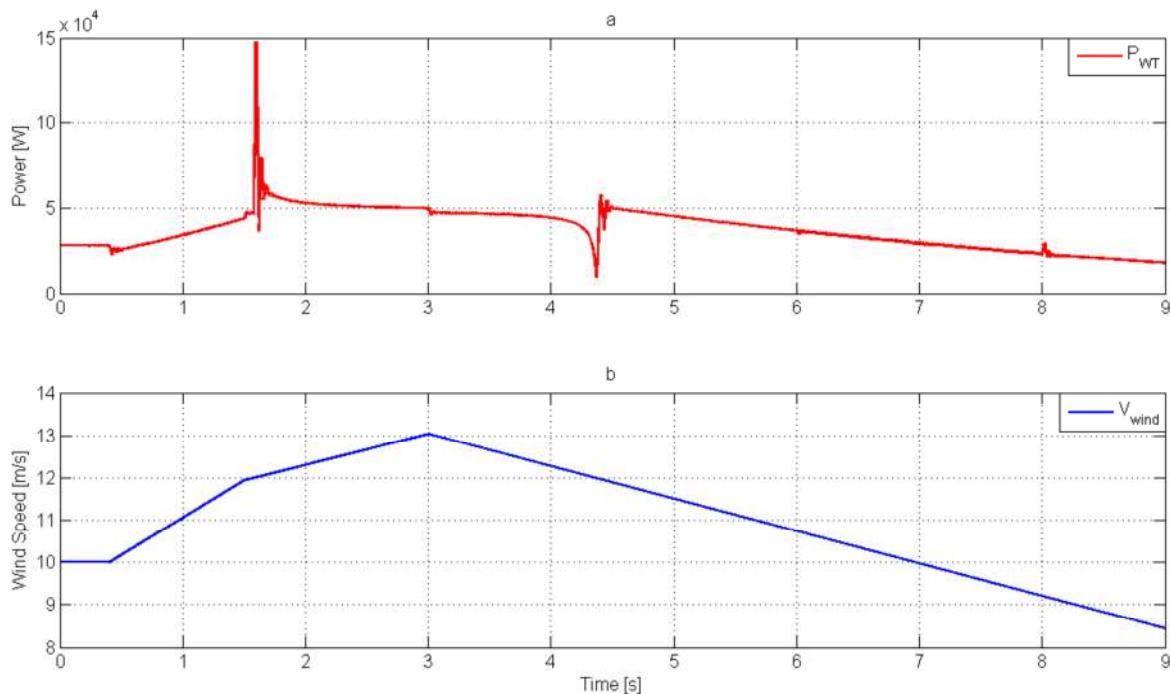
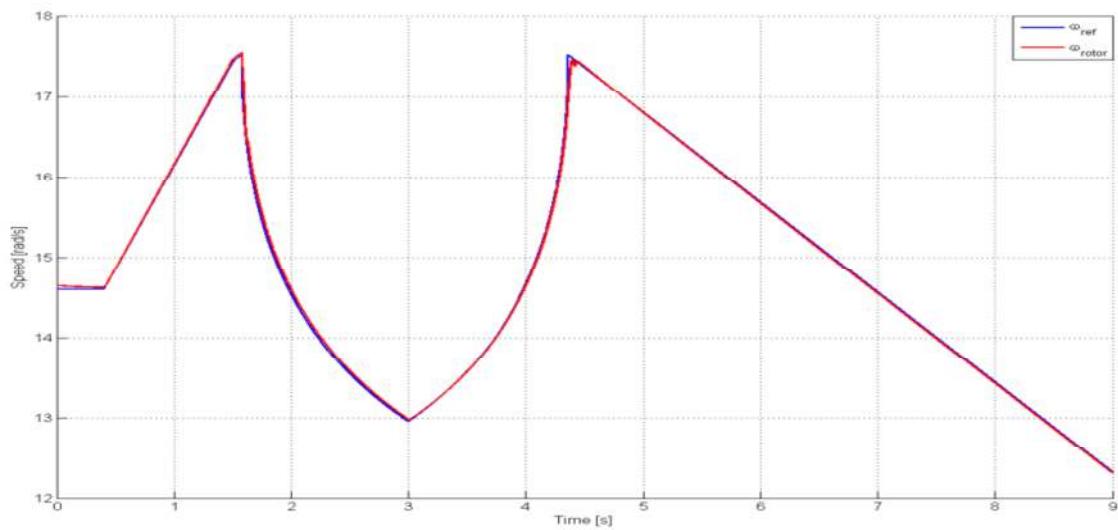
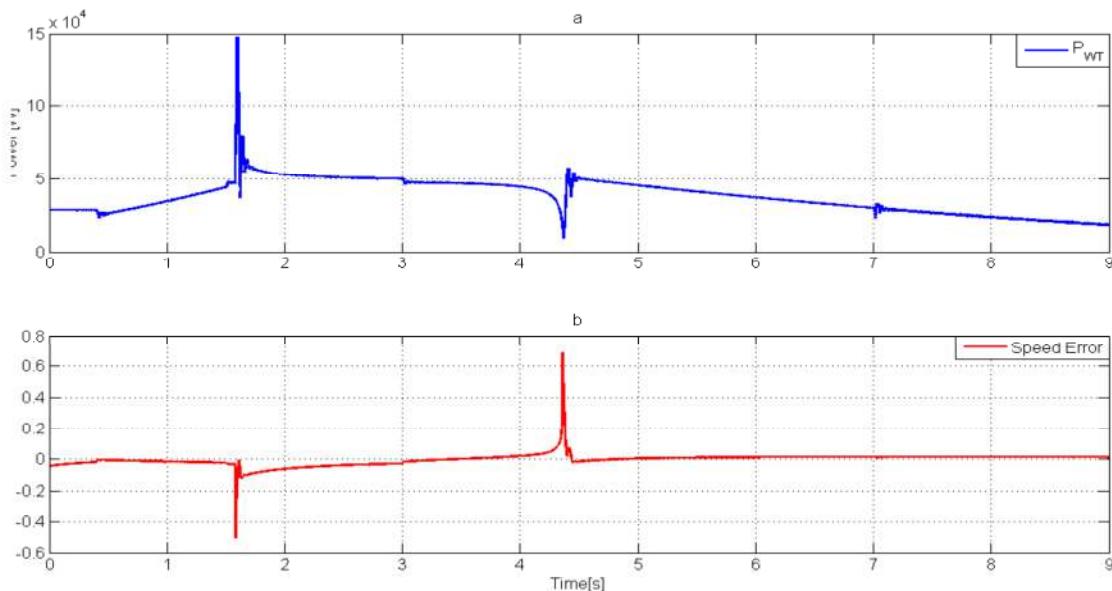


Figure 4.2:a) Puissance injectée par le TÉ en fonction b) de la vitesse du vent.

Sur la figure 4.3, la vitesse du rotor est comparée à la vitesse de référence conçue dans la commande MPPT. La vitesse de rotor la plus élevée se produit à 1,5 et 4,5 s à une vitesse de vent de 12 m/s. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à la valeur nominale, le contrôle de vitesse réduit la vitesse du rotor pour maintenir la puissance fournie à 50 kW. Sur la figure (4.4), la puissance générée par le WT est comparée à l'erreur du comparateur représenté sur la figure 4.3 Il est clair que les transitoires sont provoqués par la commande de vitesse, en raison d'une variation rapide de la vitesse du rotor. Le pic élevé du transitoire est causé par la libération soudaine d'énergie cinétique qui se produit chaque fois que la vitesse du vent atteint la valeur nominale.

**Figure 4.3:** Commande de vitesse pour le modèle WT.**Figure 4.4:** Comparaison entre a) la puissance générée par le WT, b) l'erreur de vitesse.

Dans le modèle PV, la valeur d'éclairement et la puissance générée par le générateur PV fluctuent comme illustré à la figure (4.5). La puissance générée atteint la valeur nominale lorsque l'éclairement est de 1000 W/m^2 . Par conséquent, le contrôle MPPT fonctionne correctement pour permettre au modèle de fournir la puissance maximale pour chaque valeur d'éclairement. Ce contrôle MPPT a été expliqué au chapitre précédent. La figure (4.6) illustre la comparaison entre dI/dV et I/V . Où l'erreur est proche de zéro pendant toute la région sauf avec la valeur d'éclairement minimal, où il y a un pic lorsque l'éclairement cesse de diminuer et commence à augmenter.

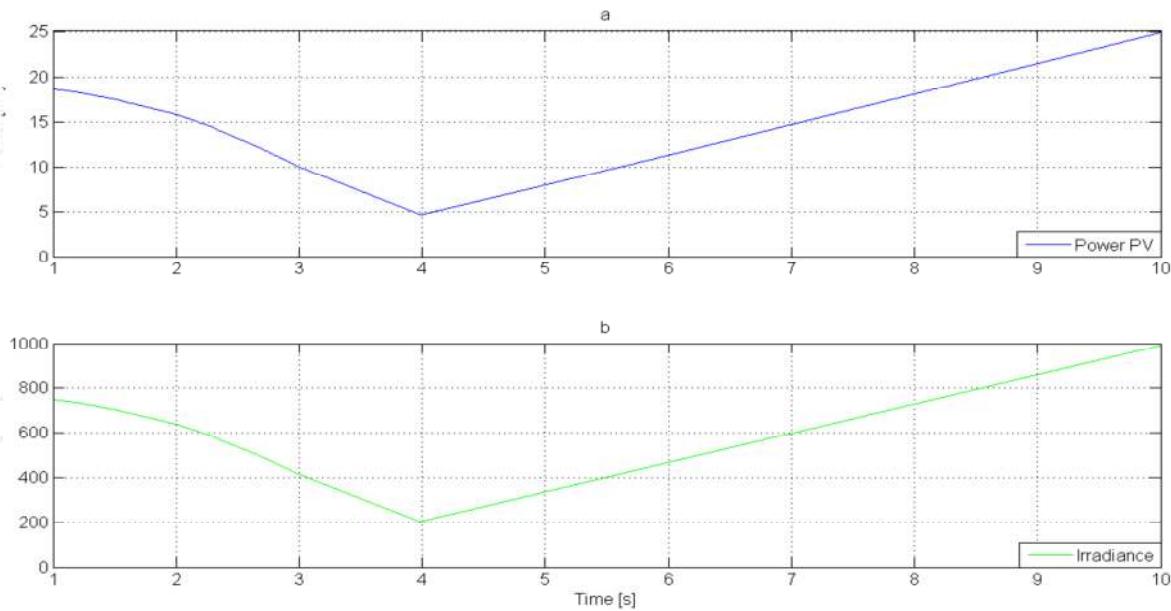


Figure 4.5: Comparaison entre a) la puissance générée par le PV, b) la valeur d'éclairement énergétique.

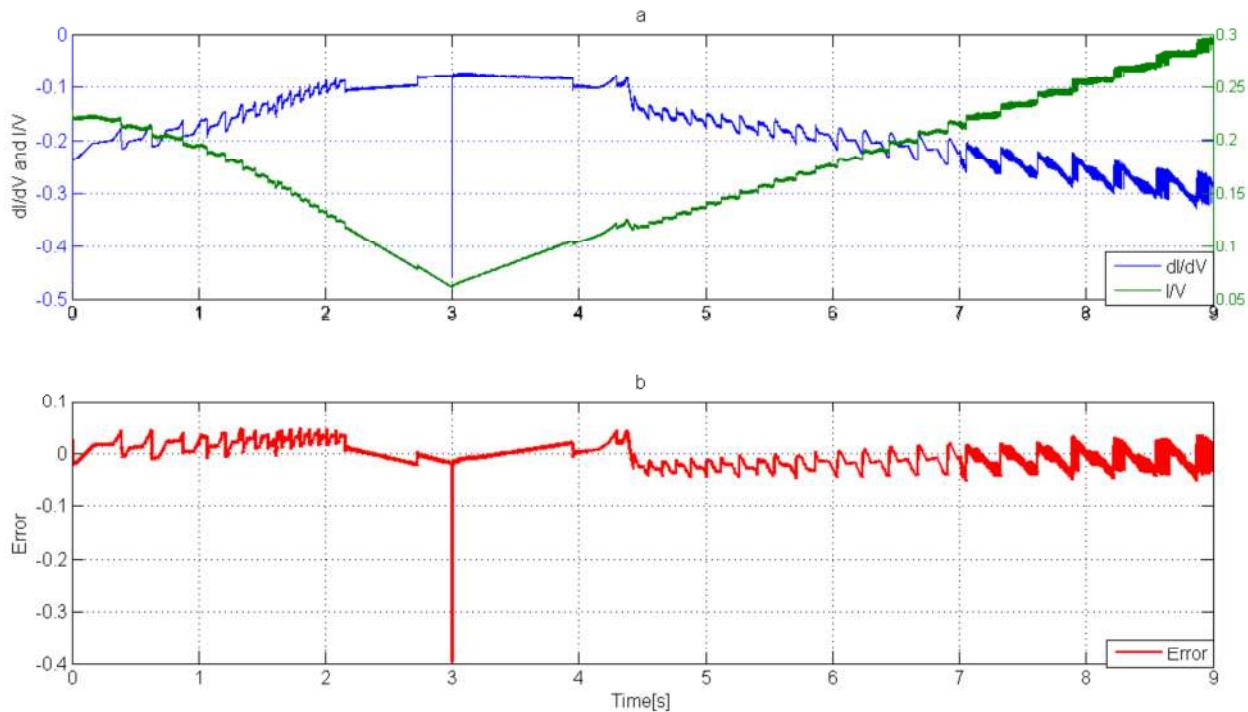


Figure 4.6: Contrôle du mode PV MPPT. a) Comparaison entre dI/dV et I/V
b) Erreur.

Dans ce cas d'étude, l'ESS contrôle le flux de puissance et le bus de tension continue. La tension de référence a été choisie au chapitre précédent, avec une valeur de 800V. Sur la figure (4.8), la comparaison entre la tension du bus DC et la tension de référence

est illustrée. L'ESS reste la valeur de tension à 800V, sauf à 1.5s et 4.5s (quand apparaissent les transitoires provoqués par le WT).

L'ESS contrôle le flux d'énergie sur le micro-réseau illustré à la figure (4.7) en injectant et en consommant de l'énergie par le convertisseur bidirectionnel. Le flux de puissance dans le système DC est affiché sur la figure 4.7, ici il est intéressant de remarquer la variation du flux de puissance ESS au temps 3s, lorsqu'une deuxième charge DC est connectée au micro-réseau. En particulier l'ESS fait face avec le déséquilibre de puissance passant du mode charge au mode décharge. De plus, la fluctuation du WT, due à l'inertie du PMSG, est régulée par l'ESS. La figure 4.8 illustre la valeur SOC et la tension des batteries. La tension sur les batteries augmente lorsque l'ESS est en charge et diminue lorsqu'une deuxième charge CC est connectée et que l'ESS décharge de l'énergie pour équilibrer le flux d'énergie. La valeur SOC change légèrement en raison de la durée limitée de la simulation. Pour pouvoir montrer un cycle de décharge complet, le temps de simulation doit être supérieur à une heure.

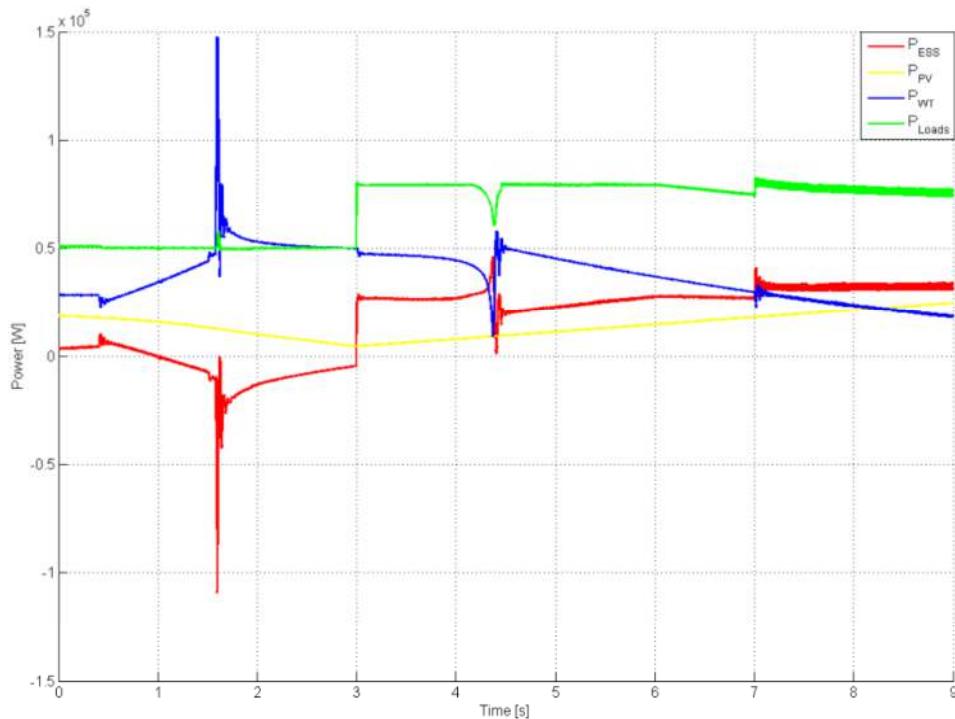


Figure 4.7: Flux de puissance dans le micro-réseau pour le Cas 1

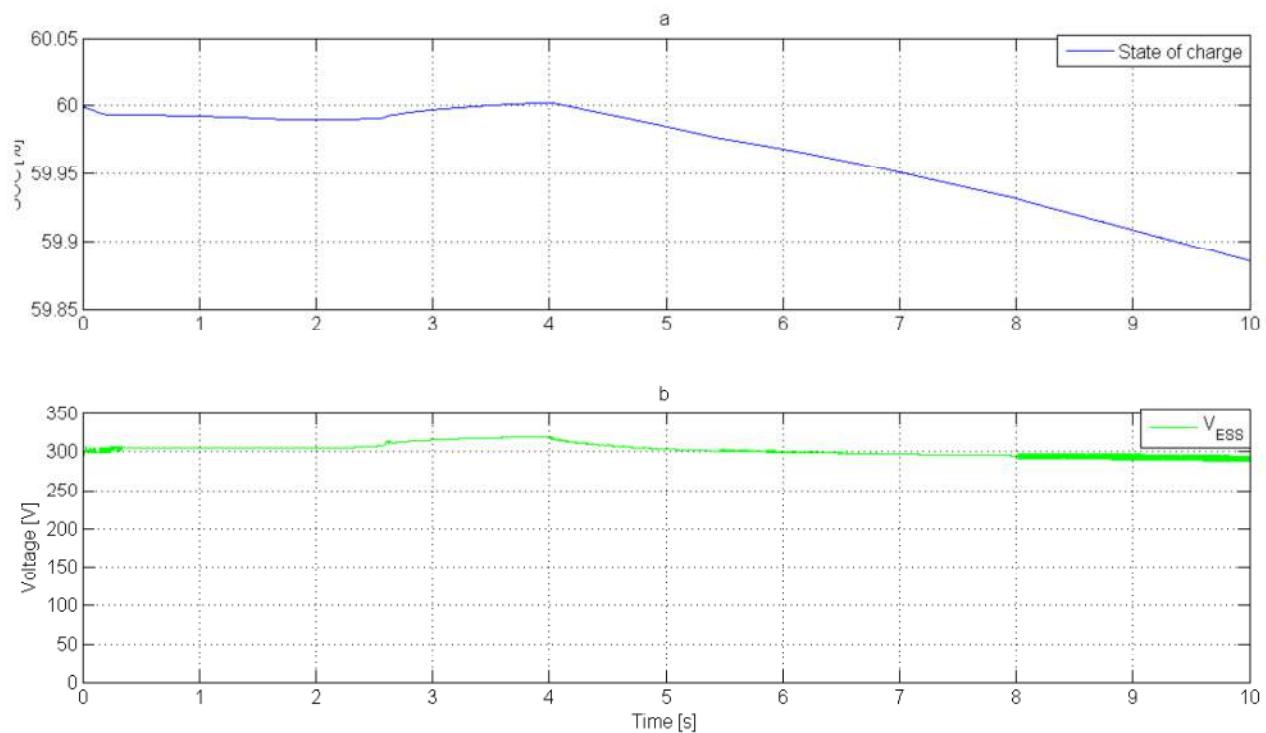


Figure 4.8: Caractéristiques ESS : a) SOC, b) Tension.

La tension dans le micro-réseau DC est illustrée à la figure (4.9), elle est constante avec une fluctuation d'environ 2 % sauf lorsque les transitoires WT apparaissent.

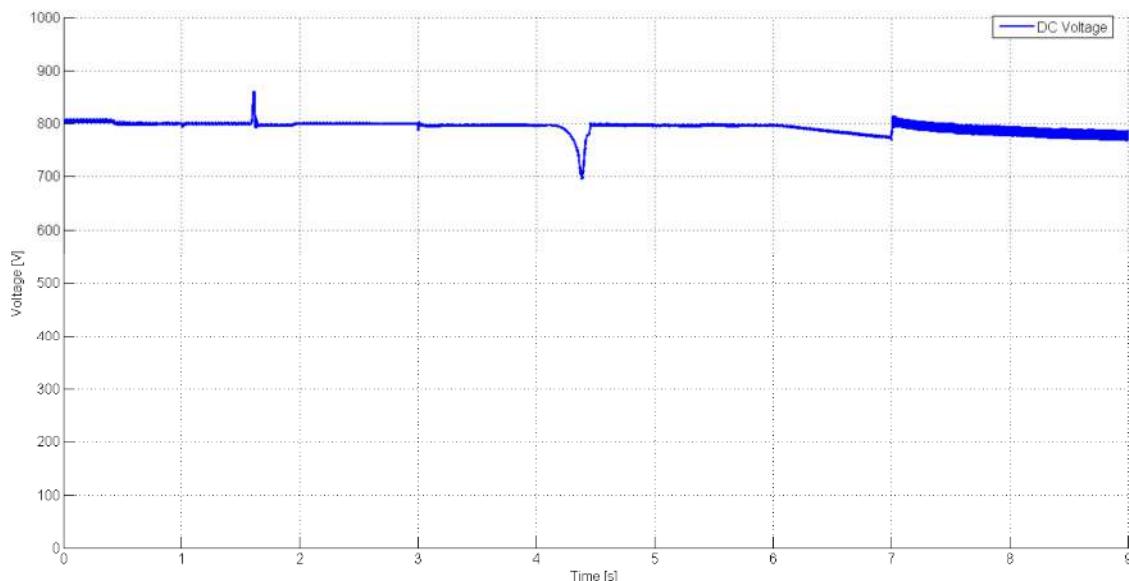


Figure 4.9: Niveau de tension continu sur le micro-réseau pour le Cas 1.

4.3. Cas 2

Dans le deuxième cas, le micro-réseau est mis en œuvre pour fonctionner en réseau connecté où le VSC est le contrôleur "maître", pour contrôler le niveau de tension sur le réseau et sur le bus DC du micro-réseau et pour équilibrer le flux de puissance. Dans

ce scénario, on suppose que le PV et le WT fonctionnent à la puissance nominale sans fluctuations de la vitesse du vent et de l'irradiance.

Dans la figure 4.10, le flux de puissance sur le micro-réseau DC est affiché lorsqu'il est connecté au réseau. Lorsque les unités commencent à produire de la puissance, le réseau injecte de la puissance pour contrôler les fluctuations dues au PMSG du WT, lorsque le système fonctionne en régime permanent, la puissance injectée par le réseau est proche de zéro. Sur la figure (4.11) est représenté le niveau de tension continu après les 0,5 premières secondes, lorsque, en raison des transitoires PMSG, la tension est supérieure à la valeur de référence.

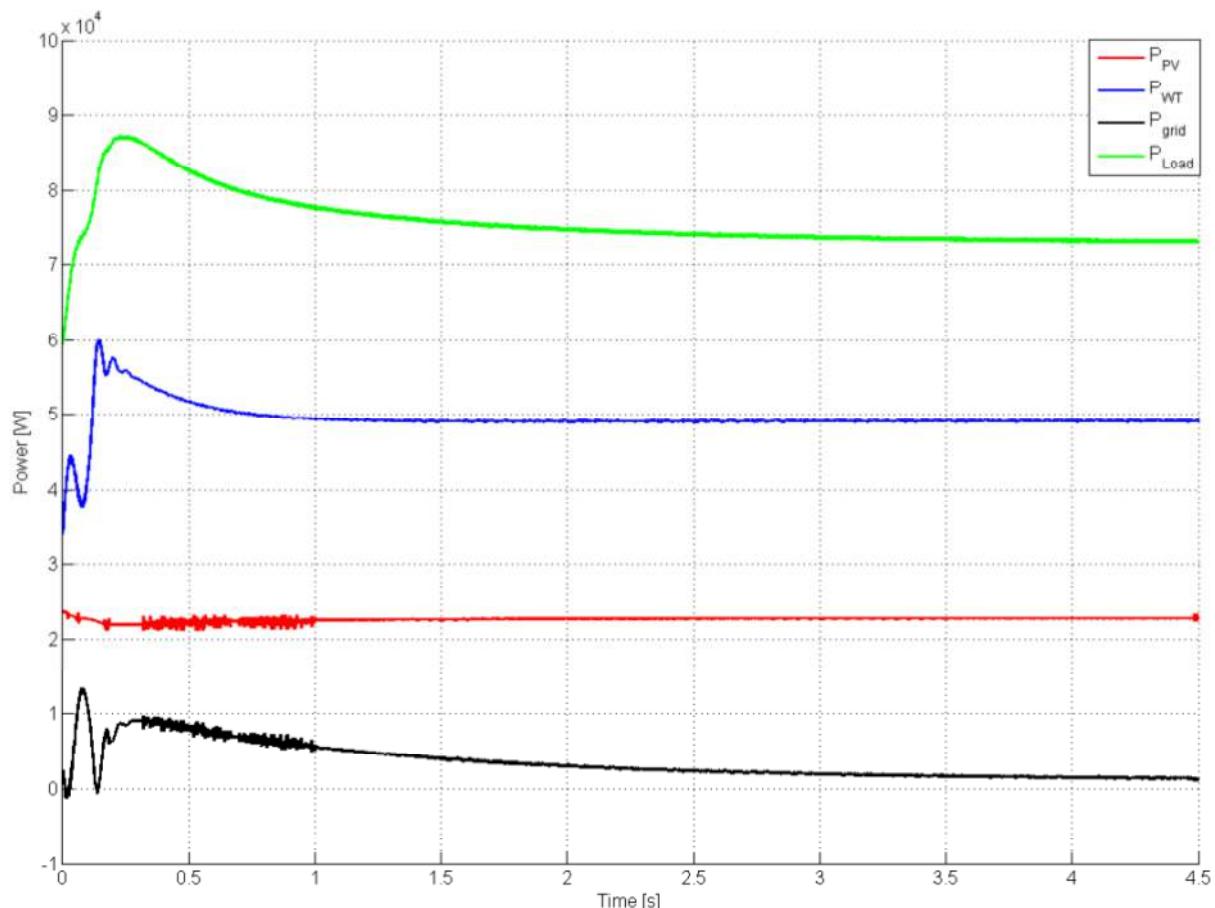


Figure 4.10: Flux de puissance dans le micro-réseau pour le Cas 2.

La tension continue fluctue autour de 5%, cela pourrait être amélioré en modifiant les paramètres du VSC, en trouvant la fonction de transfert pour la boucle de tension et de courant.

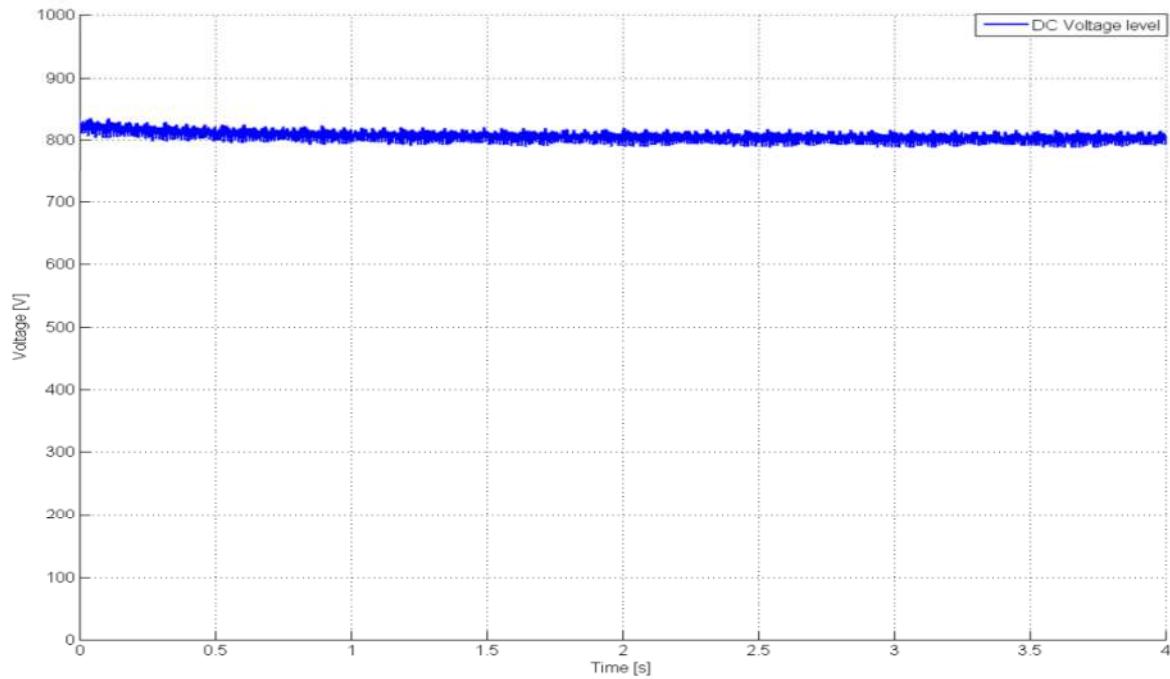


Figure 4.11: Niveau de tension CC pour le Cas 2.

La figure(4.12) illustre le flux de courant du système, en raison d'une tension continue fixe, il est clair que la tendance du flux de puissance sur la figure (4.10) dépend du flux de courant.

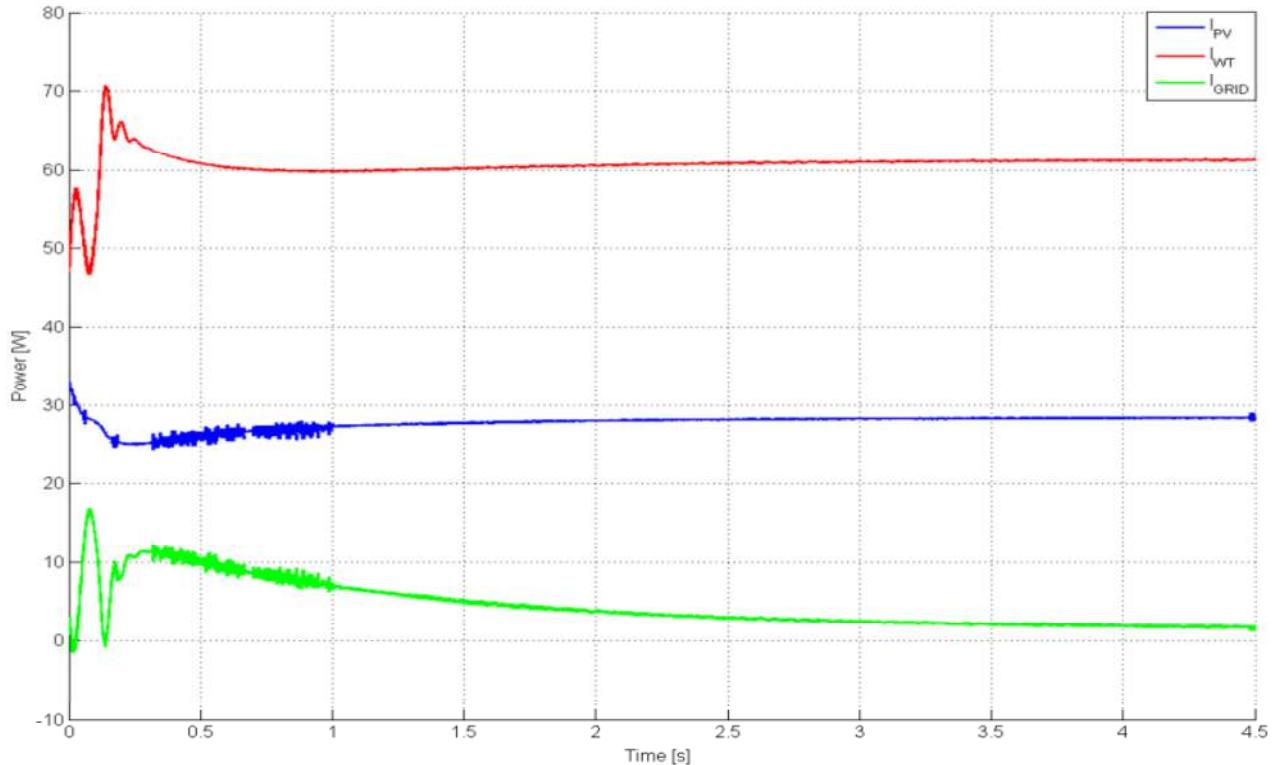


Figure 4.12: Flux de courant dans le réseau pour le Cas 2.

La sortie de l'onduleur VSC est illustrée sur la figure (4.13)a) et la sortie du filtre LC sur la figure (4.13) b) avec une tension de crête de 565 V et une fréquence de 50 Hz.

La tension alternative fournie au réseau présente de petites perturbations en raison de l'échantillon de temps de la simulation. La fréquence de commutation de l'onduleur est de 10kHz et l'échantillon de temps de la simulation est de 1 μ s. Par conséquent, la précision du rapport cyclique est de $\pm 1\%$.

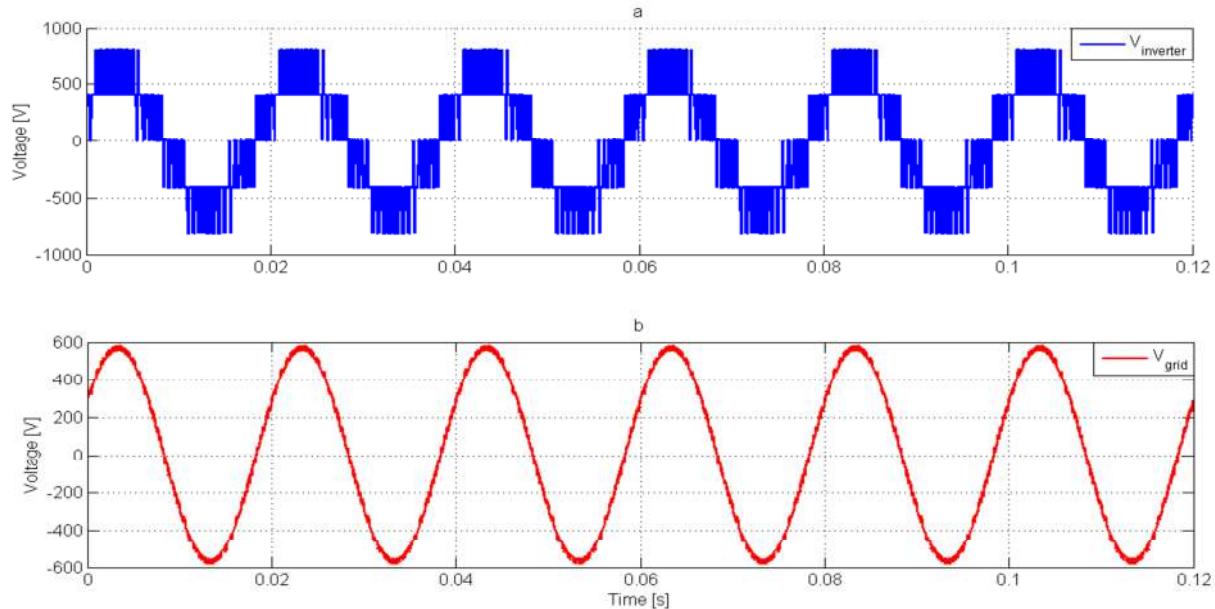


Figure 4.13:Tension dans a) le côté AC de l'onduleur, b) la tension du réseau.

4.4. Cas 3

Dans chapitre précédent, il a été expliqué que la configuration de micro-réseau DC utilisée fonctionne correctement dans le cas où une seule unité est capable de faire fonctionner un tel maître. Dans ce paragraphe, les résultats lorsque plusieurs unités maîtres fonctionnent en même temps seront affichés et le problème au sein du micro-réseau sera signalé dans le réseau connecté. .

La figure (4.14) montre comment le niveau de tension continue fonctionne correctement. En concluant qu'en travaillant avec 3 unités maîtres, la tension continue est équilibrée dans la valeur souhaitée avec une fluctuation autour du 5%.

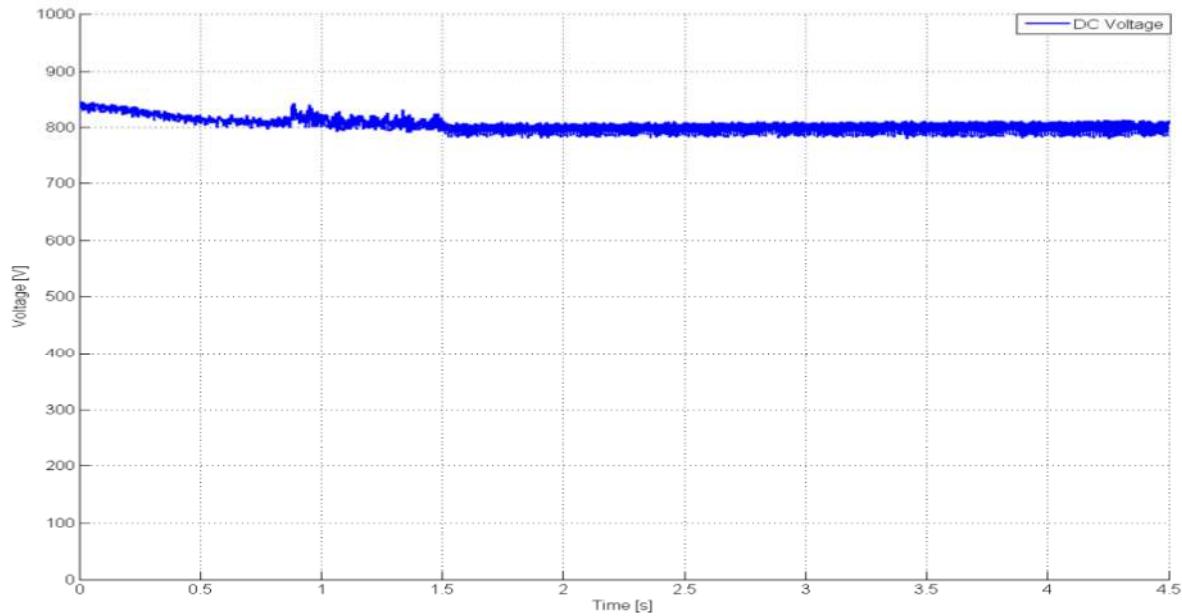


Figure 4.14: Niveau de bus de tension DC avec 3 unités Master

Les modèles PV et WT fonctionnent toujours comme des unités esclaves, n'injectant que du courant dans le système. Par conséquent, la puissance générée sera la même que celle indiquée au chapitre précédent. La figure (4.15) montre le flux de puissance sur la charge, le PV et le WT. La fluctuation du WT est due au PMSG. Pour comprendre les fluctuations de la charge, la figure 4.16 illustre la fluctuation de la puissance générée par l'ESS et le GE. Là où la puissance délivrée par l'ESS fluctue à plus de 100kW et le GE à près de 50kW. Cela se produit parce que les deux contrôleurs différents poursuivent le même point de consigne avec des dynamiques différentes provoquant un pic de courant. Par conséquent, le courant injecté fluctue, ce qui rend le système instable car l'ESS et le GE ne peuvent pas fonctionner correctement de cette manière et la qualité de l'alimentation sur la charge n'est pas acceptable.

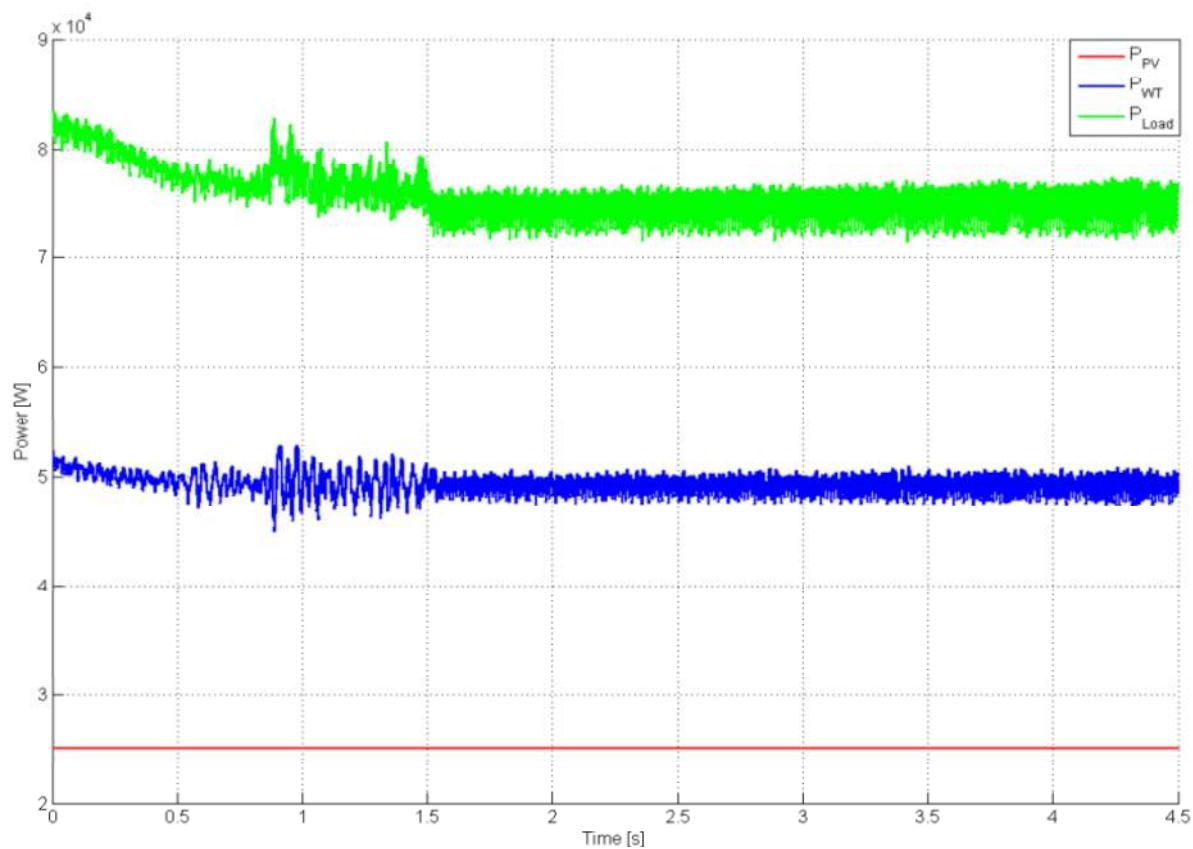


Figure 4.15: Flux de puissance dans la charge, PV et WT pour le cas 3.

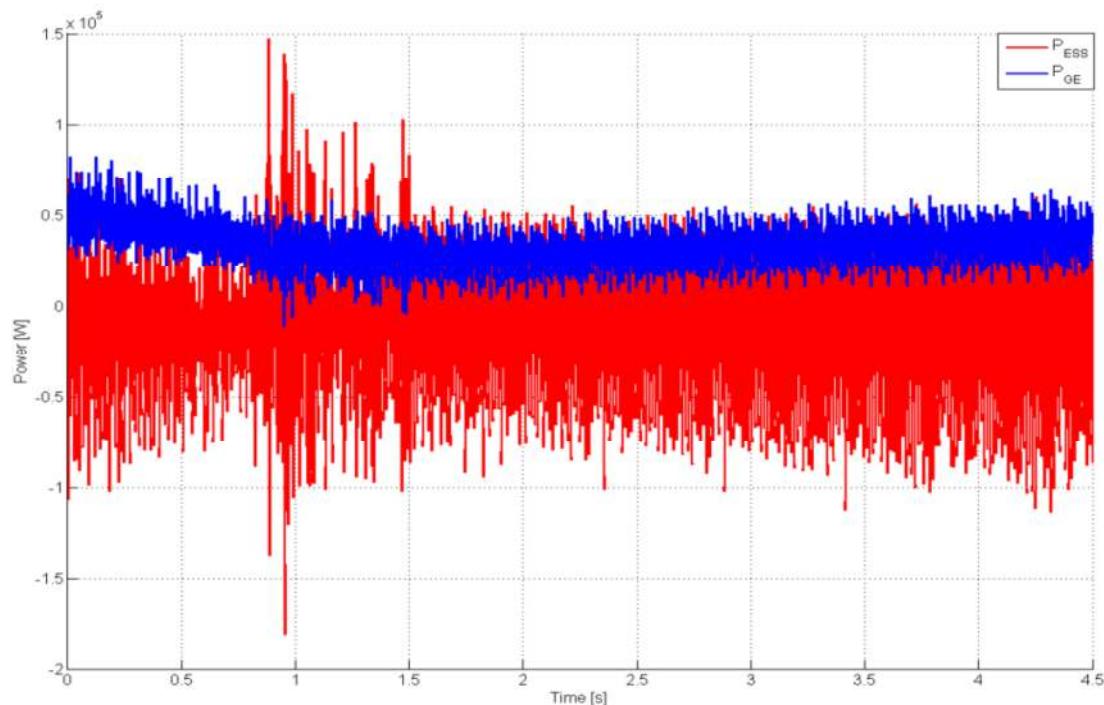


Figure 4.16: Flux de puissance dans le GE et l'ESS pour le cas 3

La figure (4.17) montre le courant injecté par le PV et le WT avec de petites fluctuations. Alors que la figure 4.18 affiche le courant injecté par le GE et l'ESS, où les fluctuations sont supérieures à 100A.

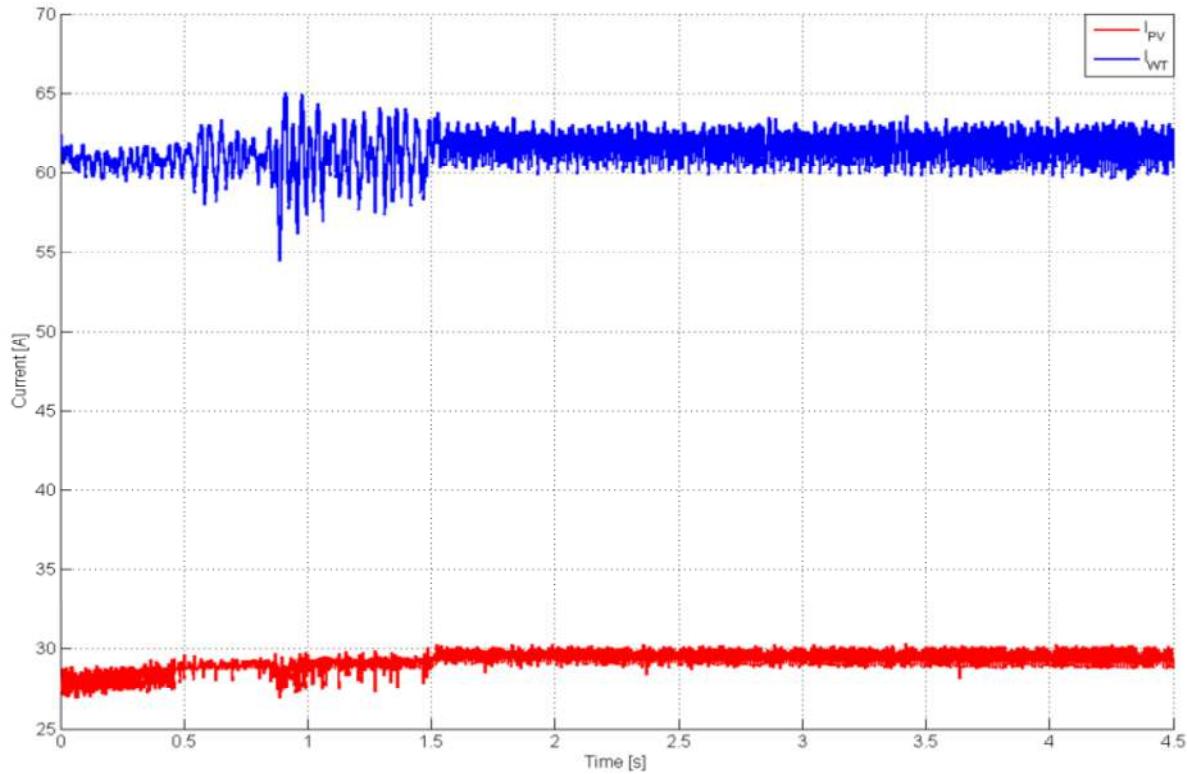


Figure 4.17: Courant injecté par le PV et le WT pour le cas 3

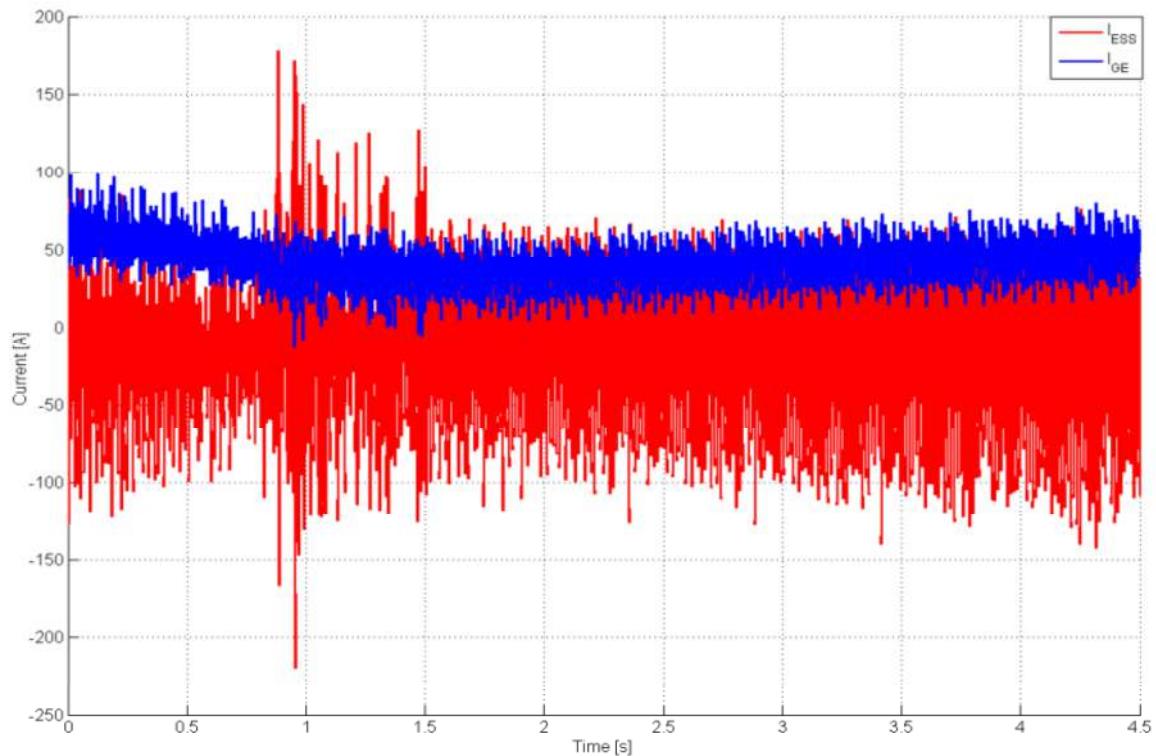


Figure 4.18: Courant injecté par l'ESS et le GE pour le Cas 3

4.5. Cas 4

Pour améliorer la fiabilité du système et éviter le problème présenté dans le cas 3, le micro-réseau est contrôlé en utilisant une seule unité comme « maître ». Les dispositifs chargés de faire cela sont le réseau, l'ESS et le GE. D'autre part, ce cas montre comment la commande intelligente est capable de maintenir le niveau de tension et le flux d'énergie du micro-réseau en cas de défauts en cascade dans le réseau AC et dans l'ESS.

Dans ce cas, jusqu'au moment 2s, le micro-réseau est connecté au réseau AC, donc le VSC fonctionne comme unité "maître" pour contrôler le niveau de tension. Au temps 2s, un défaut dans le réseau est supposé et le micro-réseau est déconnecté du réseau AC et contrôlé par le convertisseur bidirectionnel de l'ESS en tant que contrôleur "maître". Enfin au temps 3.5s le GE est appelé tel "maître" en déconnectant l'ESS. La figure (4.19) montre le profil du bus de tension CC. Dans la première région, il y a une légère oscillation due aux régulateurs de l'onduleur liés au réseau. Alors que dans l'intermédiaire, le profil de tension semble plat lorsque l'ESS agit en tant que "maître". La transition entre le mastering ESS vers celui du GE est affectée par un transitoire initial qui est amorti en moins de 100 ms.

La figure (4.20) montre les comportements de la puissance pour toutes les unités du système dans les trois scénarios différents.

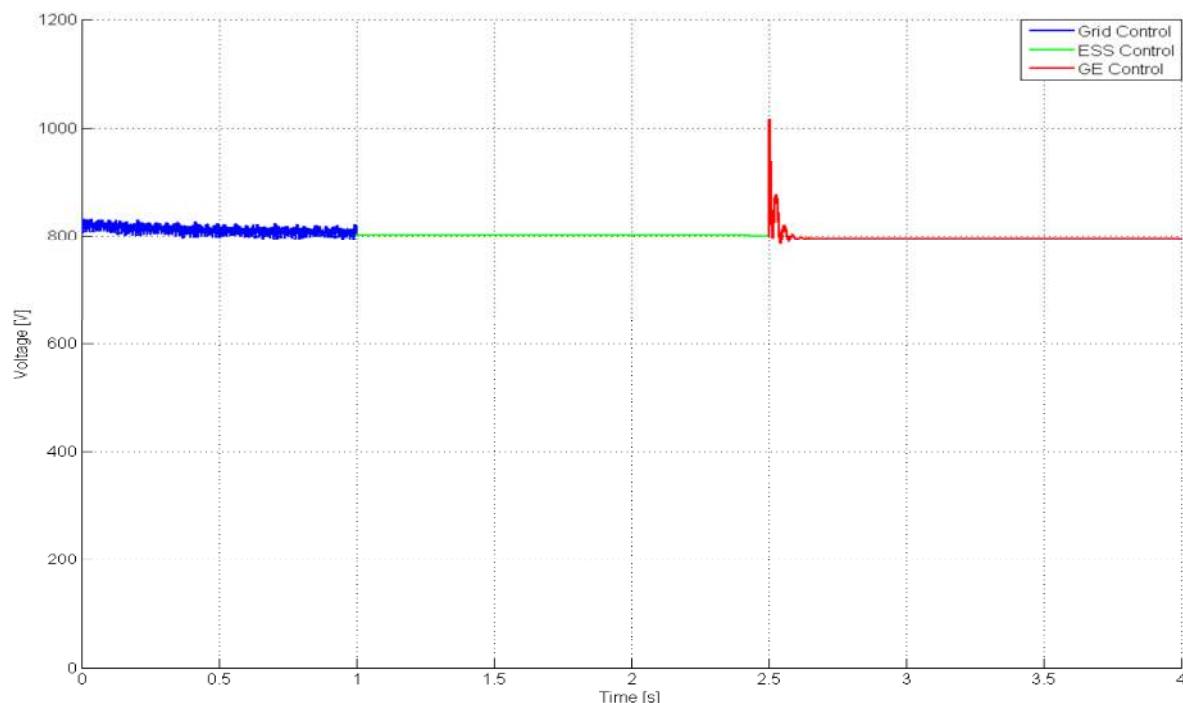


Figure 4.19: Niveau de tension CC pour chaque période de Master Control.

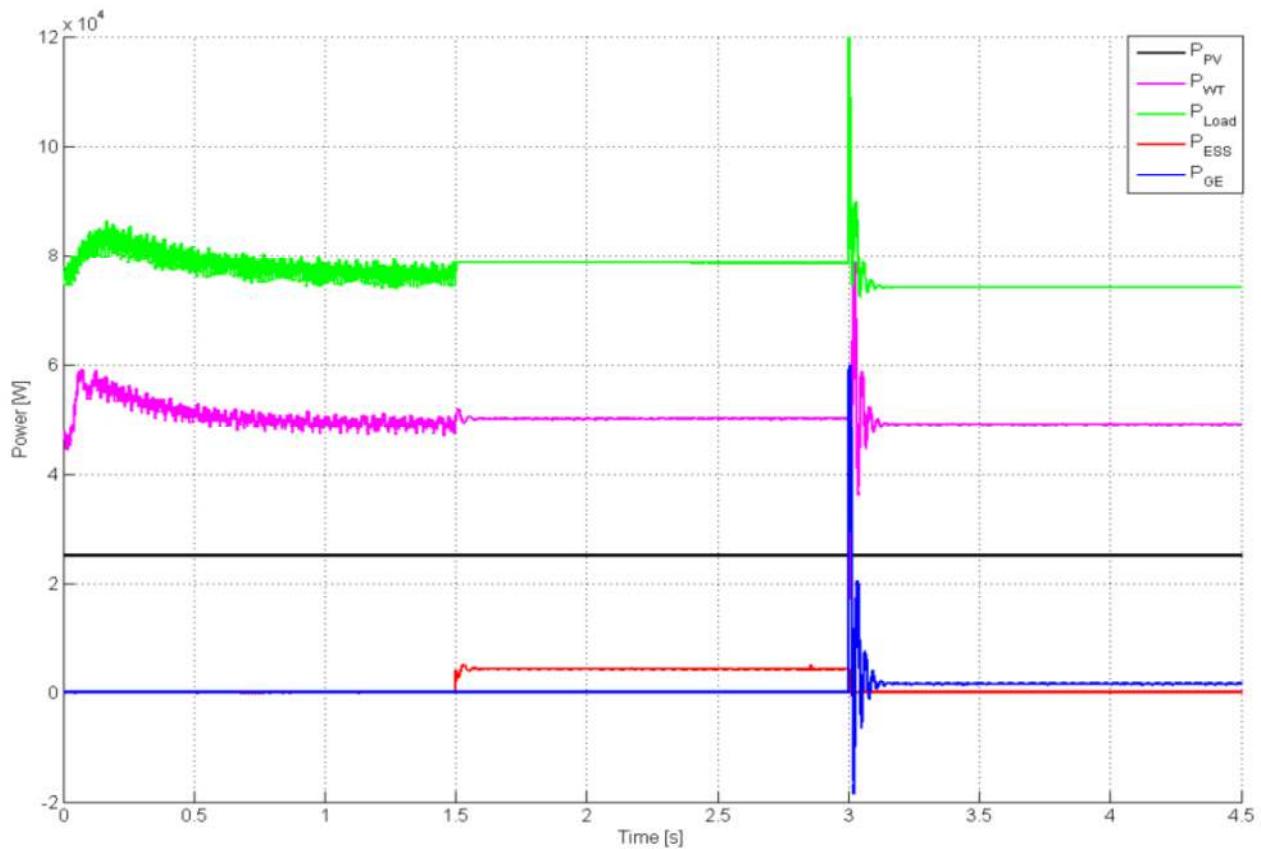


Figure 4.20: Flux de puissances dans le micro-réseau pour le Cas4.

4.6 Conclusion

A travers ce présent chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de l'étude d'un micro réseau en s'appuyant sur quatre cas différents pour voir son comportement pour chacun. On a pu voir l'efficacité du contrôle intelligent des puissances dans le MicroGrid. Les différentes simulations faites avant ces dernières, avaient l'objectif de coordonner les parties importantes qui constituent le micro-réseau.

Conclusion générale

Nous avons présenté un système de production d'électricité basé sur un micro-réseau DC muni de générations en PV, WT, GE et ESS connectée au réseau. Différentes méthodes de contrôle sont proposées pour augmenter la puissance injectée, équilibrer le flux de puissances et le niveau de tension du micro-réseau. La stratégie de contrôle proposée basée sur le contrôle MPPT pour les modèles PV et WT et le contrôle de tension et de puissances pour le GE et l'ESS a été implémentée dans Simulink. La conception du convertisseur bidirectionnel et du convertisseur élévateur a été réalisée en considérant le circuit équivalent et leurs fonctions de transfert. Enfin, le contrôle du convertisseur boost a été prouvé grâce aux diagrammes de Bode, sous l'environnement Matlab/Simulink. Du point de vue économique, un contrôle économique intelligent a été mis en place pour évaluer la participation du micro-réseau au marché de l'électricité en utilisant l'ESS. Trois cas d'étude ont été menés sous Matlab/Simulink, à partir des résultats obtenus, diverses observations ont été tirées :

- Le micro-réseau est en mesure d'obtenir un bénéfice par une participation optimale du système au marché de l'électricité.
- Les batteries Plomb-Acide avec des électrodes en carbone renforcées sont très importantes au cours de l'échange de l'énergie avec le réseau par une participation optimale ou une application d'équilibrage.

En utilisant le modèle de micro-réseau DC développé dans ce travail, quatre cas d'étude ont fait l'objet de notre réalisation. A partir des résultats obtenus par la simulation, diverses observations ont été faites :

- Il est confirmé que le PV et le WT peuvent fonctionner en mode MPP.
- L'ESS est capable d'équilibrer le flux de puissances et de stabiliser le niveau de tension.
- Une seule unité peut fonctionner en tant qu'unité « maître » pour assurer le bon comportement du système.
- S'il y a un défaut sur l'ESS ou presque hors charge, le convertisseur GE est en mesure d'assurer l'alimentation électrique sécurisée et le fonctionnement efficace du micro-réseau en mode îloté.

Les conclusions faites dans ce travail conduisent à plusieurs propositions pour les travaux futurs en cours de développement.

Tout d'abord, la limitation technique du matériel doit être réglée en utilisant un ordinateur plus puissant, ainsi une simulation plus longue pourrait fournir des scénarios plus réalistes, sur le comportement du micro-réseau, c'est-à-dire le SOC des batteries ou/et le comportement du WT.

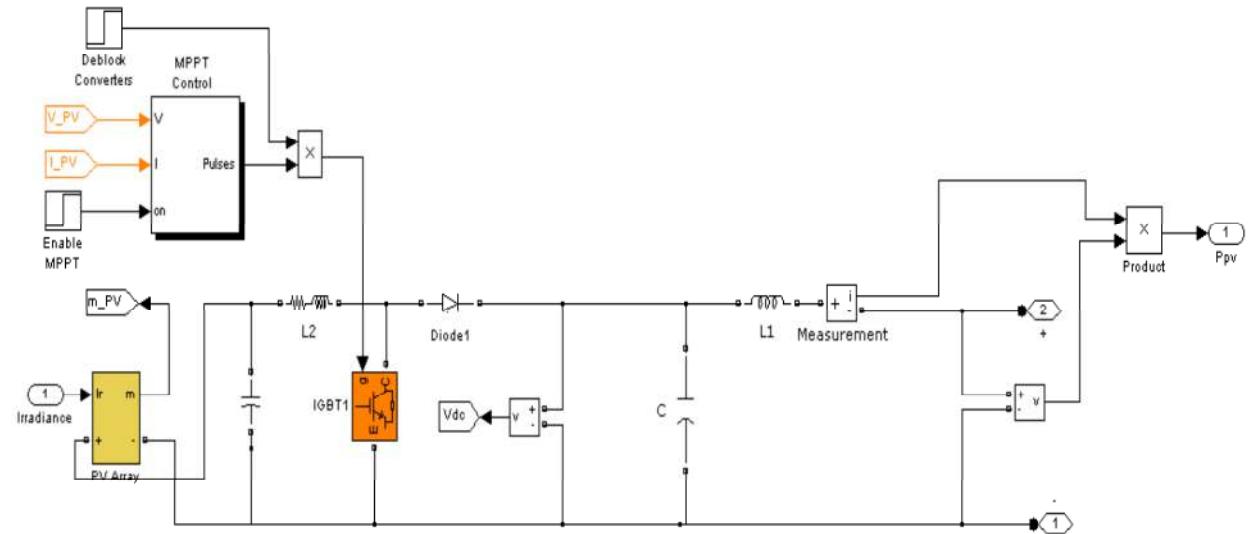
L'onduleur VSC du réseau a été obtenu à partir d'un modèle de démonstration dans Matlab/Simulink, il n'était donc pas adapté pour contrôler le flux de puissances du

Conclusion générale

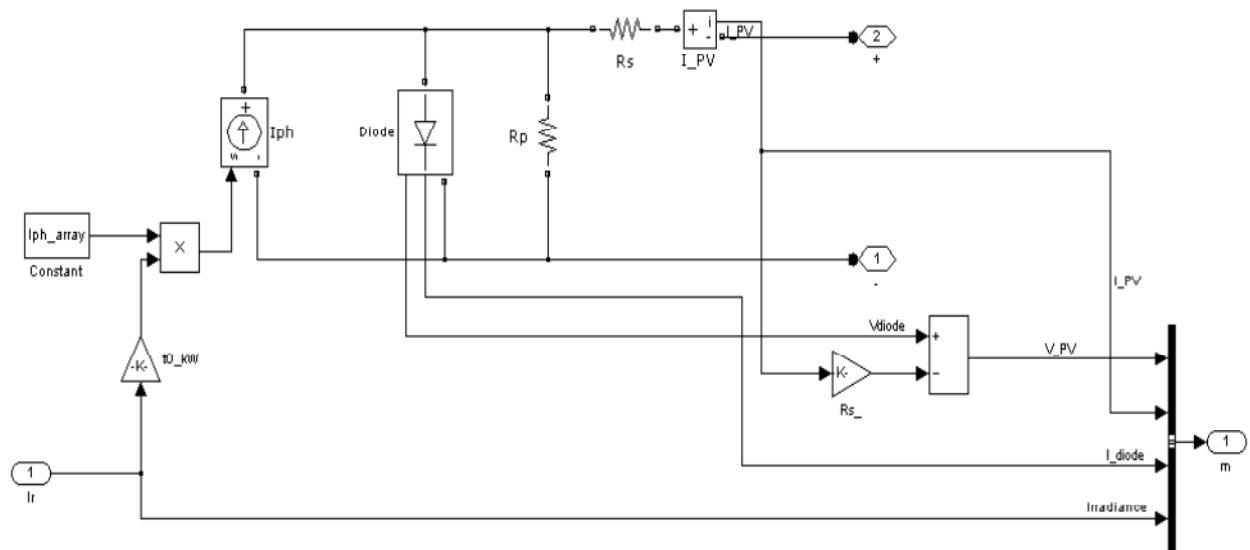
système. Pour les travaux futurs, la mise en œuvre d'un autre onduleur contrôleur pourrait être intéressante, pour étudier les possibilités d'échange de flux de puissances entre le réseau et le système de micro-réseau (i.e. ESS).

ANNEXE - MICROGRID IMPLÉMÉTÉ dans SIMULINK;

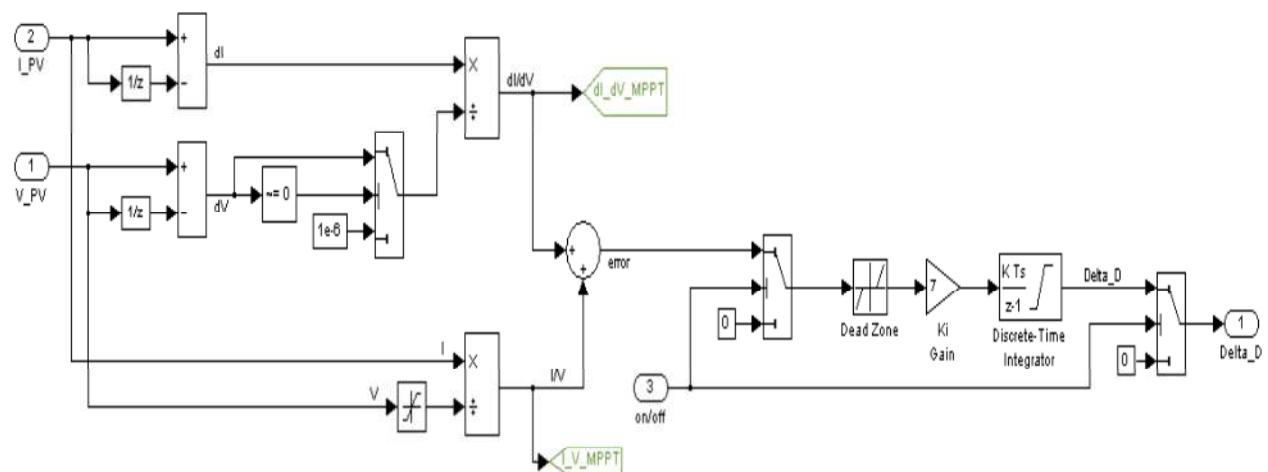
1 Modèle photovoltaïque:



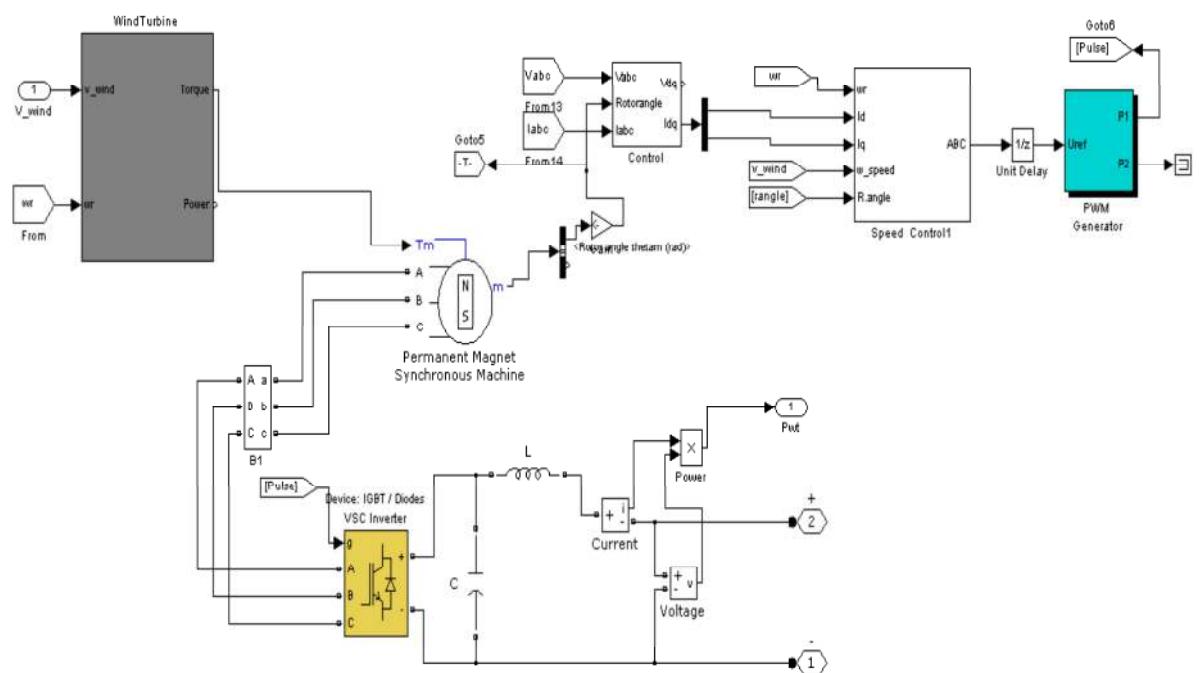
1.1 Panneau photovoltaïque :



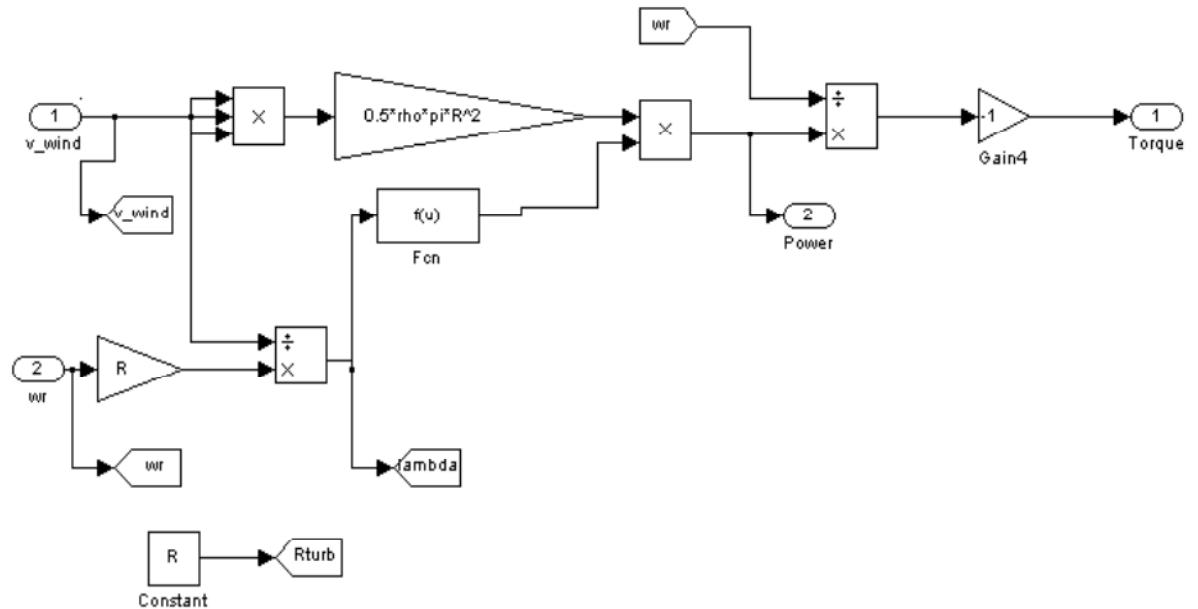
1.2 Contrôle MPPT :



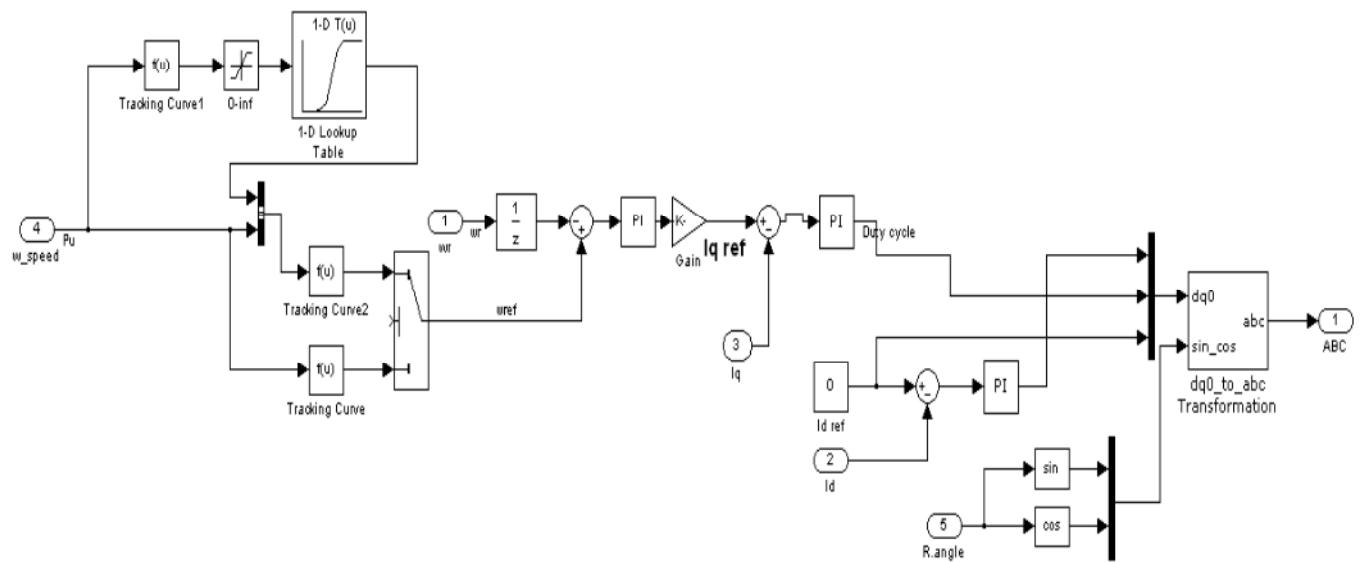
2 Modèle éolienne WT :



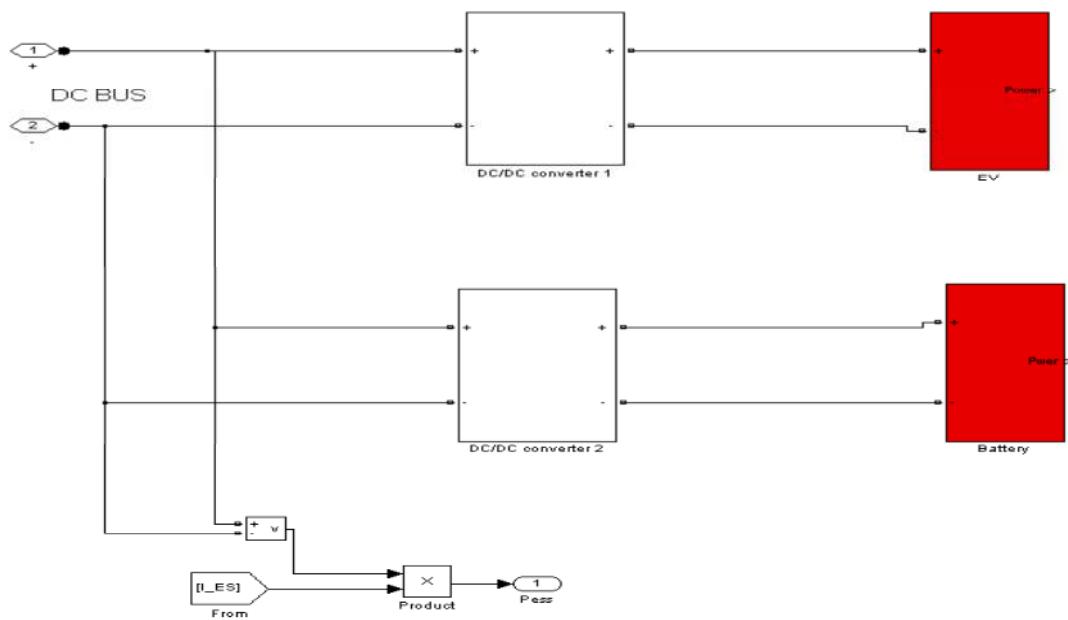
2.1 Eolienne :



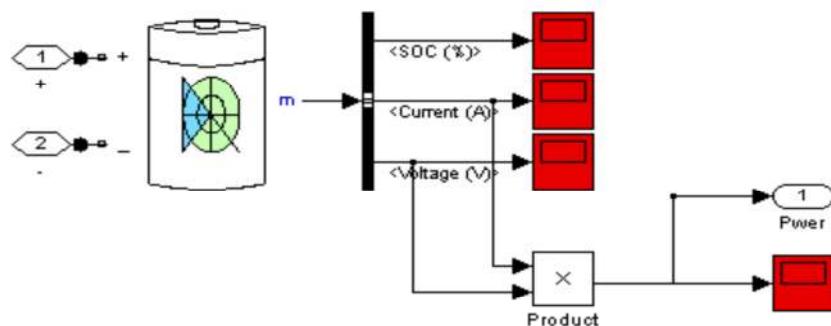
2.2 Contrôle de la vitesse :



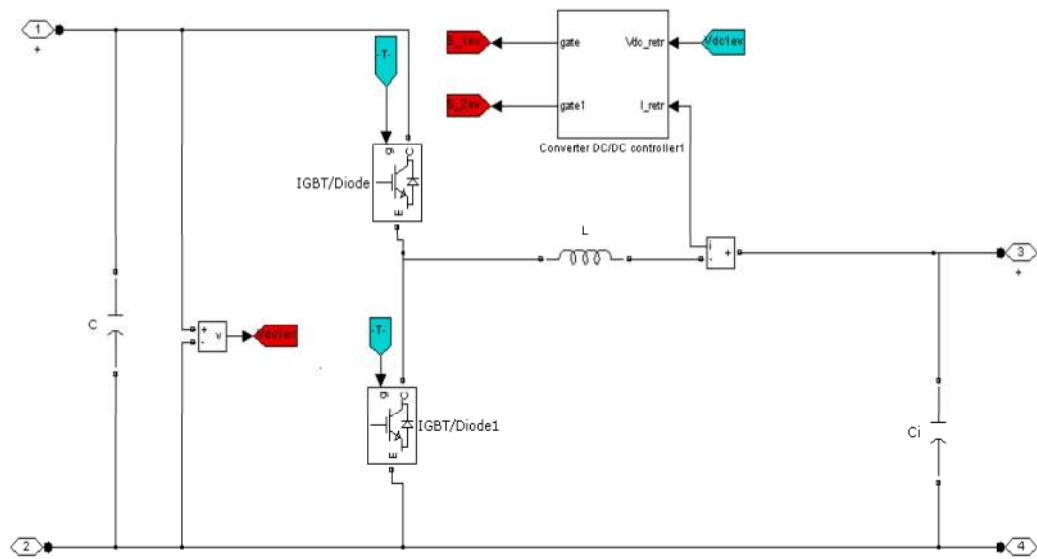
3 Modèle ESS:



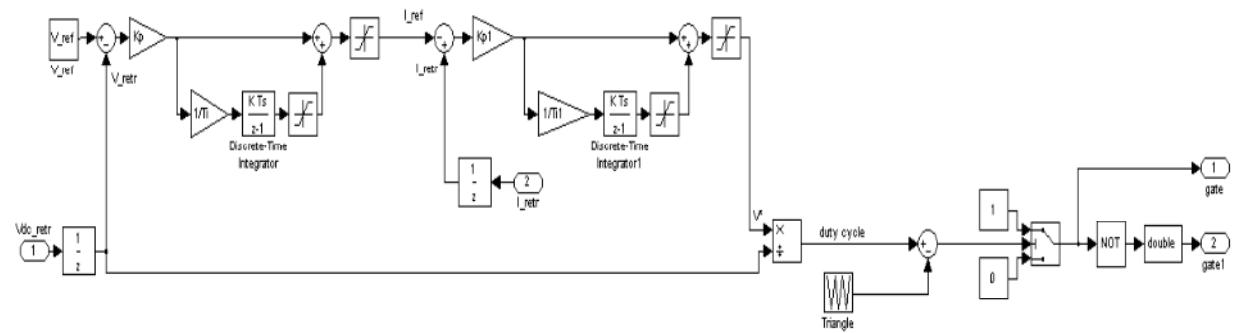
3.1 Modèle batterie:



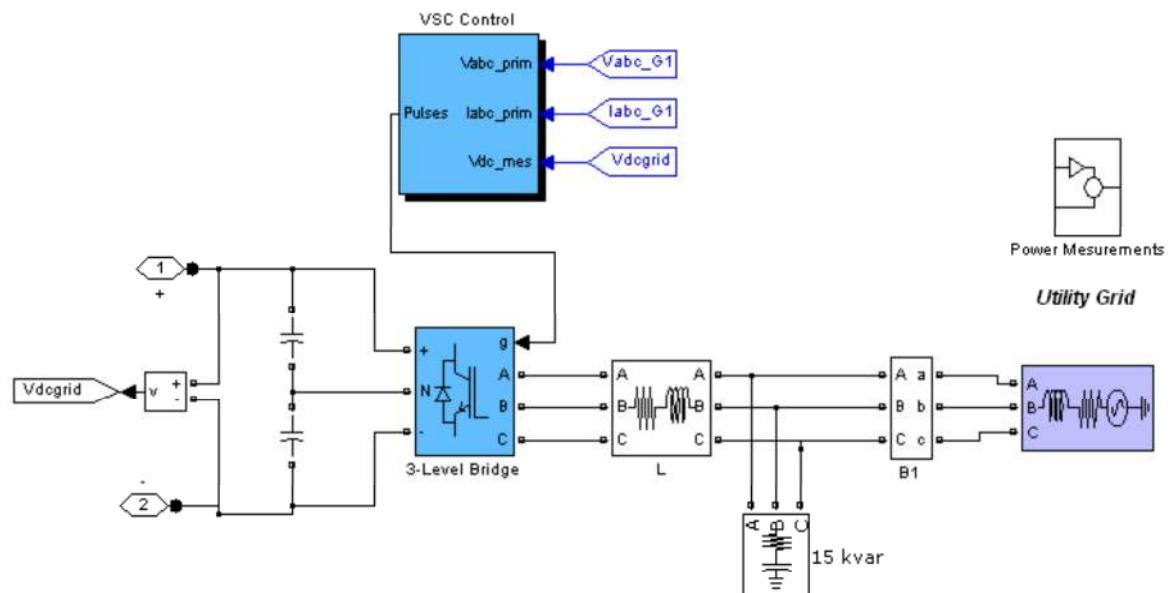
3.2 Convertisseur bidirectionnel :



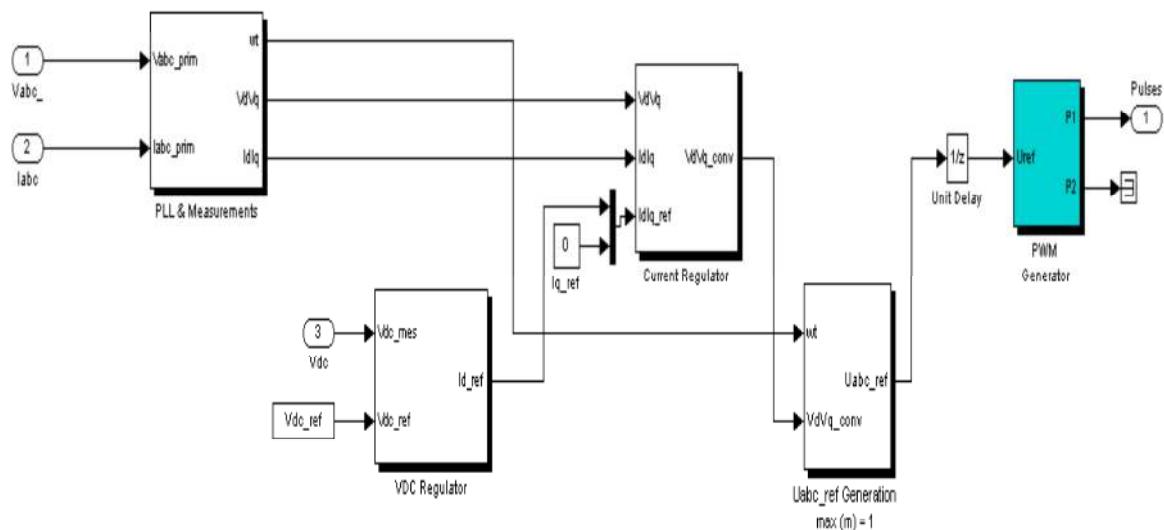
3.3 Contrôle bidirectionnelle:



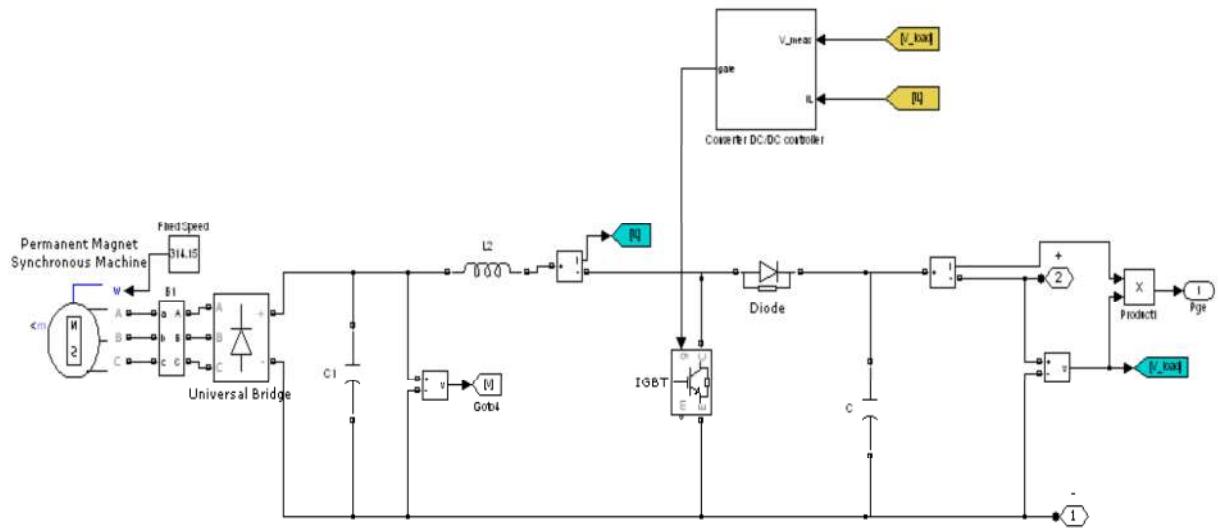
4 Modèle du réseau :



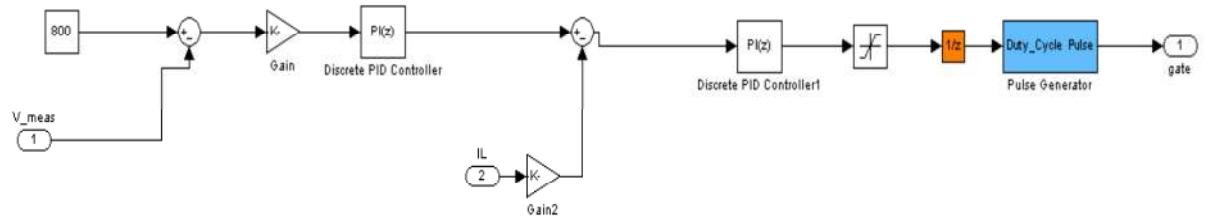
4.1 Contrôle de VCS:



5 Modèle de GE:



5.1 Contrôle de tension:



BIBLIOGRAPHIE

[1]: Voir le lien Web : <https://www.iea.org/> pour l'Agence internationale de l'énergie (AIE) (dernier accès le 09 mars 2019).

[2]: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 de Doctorat, PRES Université Lille Nord-de-France2014

[3]: C. DARRAS, “ Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE”, Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.

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

[5]: « La cellule photovoltaïque ». Document technique, Centre de recherche de Développement De l'ECAM.

[6]:R. MAOUEDJ, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzaréah ». Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd. Département de physique, 2005.

[7]: C. ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF, « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque pour la ville de Tlemcen(Algérie) », Revue énergies renouvelables, Vol.6, pp.69-76, 2003.

[8]: T. FOGELMAN, « Système photovoltaïque pour les pays en développement », Manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, (AFME) – septembre 1982.

[9]: A. LABOURET, M. VILLOZ, « Energie solaire Photovoltaïque ». Livre, 3ème édition, Paris France,2003.

[10]: L. ABDELHAMID, « Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens -Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement ». Thèse Doctorat, Université de Batna, 2012.

[11]: L. ABBASSEN, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque ».Mémoire Magister, université de Tizi-Ouzou, 2011

[12]:M.Huart, « Guide des énergies renouvelables », Association pour la promotion des énergies renouvelables, Ministère de la Région wallonne éditeur, 1994

[13]:L. Chang, ‘Systèmes de Conversion de l'Energie Eolienne’, IEEE Canadian Review, pp. 1 – 5,2002.

[14]: B.BOUKHEZZAR, « Stratégies de Commande pour L'optimisation et la Régulation de Puissance des Éoliennes à Vitesse Variable ». Thèse de Doctorat de l'université de Pari XI France, 2006

BIBLIOGRAPHIE

- [15]: N. MEKKAOUI, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée ». Mémoire Magister, Université Batna, 2004
- [16]: L.KHATTACHE, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentée ». Mémoire Magister, Batna, 2007
- [17]: A. RAMLI, « Contribution à l'amélioration des performances d'un aérogénérateur basé sur MSAP». Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2010
- [18]:N. La verdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens –Intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [19]:H.Bevrani, B. François, and T.Ise, Microgrid Dynamics et Control. John Wiley et Sons Inc, 2017.
- [20]: R.Lasseter, A.Akhil, C.Marnay, J.Stephens, J.Dagle, R. Guttromson, A. S.Meliopoulos, R. Yinger et J. Eto, « Consortium pour la fiabilité électrique Solutions technologiques livre blanc sur l'intégration des ressources énergétiques distribuées le cert concept de micro-réseau », Tech Représentant, Lawrence Berkeley National Laboratoire, 2002.
- [21]: M. Soshinskaya, W. H. Crijns-Graus, J. M. Guerrero et J. C. Vasquez, « Microgrids : Expériences, obstacles et facteurs de succès », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 40, p. 659 – 672, 2014.
- [22]: K. Prakash, A. Lallu, F. R. Islam et K. A. Mamun, « Review of power system distribution network architecture », 2016 3rd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE), pp. 124 –130, 2016.
- [23]: D. Kumar, F. Zare et A. Ghosh, « Technologie des micro-réseaux à courant continu : architectures système, interfaces de réseau à courant alternatif, schémas de mise à la terre, qualité de l'alimentation, réseaux de communication, applications et aspects de normalisation », IEEE Access, vol. 5, pages 12230–12256, 2017.
- [24]:S. Sen et V. Kumar, « Microgrid control : A Comprehensive Survey », Annual Reviews in Control, vol. 45, p. 118–151, 2018
- [25]:D.E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A.H. Etemadi, C.A. Cañizares, R. Iravani, M. Kazerani, A.H. Hajimiragh, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, G. A. Jiménez-Estévez et N. D. Hatziargyriou, « Trends in microgrid control », IEEE Transactions sur Smart Grid, vol. 5, non. 4, p. 1905–1919, 2014.
- [26]:A. Bidram, V. Nasirian, A. DavoudietF.L.Lewis, Cooperative Synchronization in Distributed Microgrid Control. Springer, 2017.

BIBLIOGRAPHIE

- [27]: E. Unamuno et J. A. Barrena, « Hybrid ac/dc microgrids part ii: Review and classification of control strategies », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, p. 1123-1134, 2015.
- [28]: Q. L. LAM, Contrôle avancé des micro-réseaux pour la stabilité de fréquence et de tension : co-conception de contrôle robuste et validation en temps réel. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2016.
- [29]: T. L. Vandoorn, J. C. Vasquez, J. D. Kooning, J. M. Guerrero, and L. Vandevenelde, "Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no. 4, pp. 42–55, 2013.
- [30]: M. Swierczynski, R. Teodorescu, C. N. Rasmussen, P. Rodriguez et H. Vikelgaard, "Aperçu des systèmes de stockage d'énergie pour l'amélioration de l'intégration de l'énergie éolienne", dans Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on, pp. 3749–3756.
- [31]: J. Voelcker, "Les batteries au lithium prennent la route", Spectrum, IEEE, vol. 44, non. 9, p. 26–31, 2007.
- [32]: N. Mohan et T. M. Undeland, Électronique de puissance : convertisseurs, applications et conception. Wiley-Inde, 2007.
- [33]: R. W. Erickson et D. Maksimović, Fundamentals of power electronics. Springer, 2001.
- [34]: F. Blaabjerg et Z. Chen, Électronique de puissance pour éoliennes modernes, vol. 1. Morgan et Claypool, 2006.
- [35]: J. R. Bumby, N. Stannard et R. Martin, « A permanent magnet generator for smallscalewind turbines », Actes de l'ICEM 2006, 2006.
- [36]: R. Esmaili, L. Xu et D. K. Nichols, "Une nouvelle méthode de contrôle du générateur à aimant permanent pour le suivi de la puissance maximale dans l'application des éoliennes", dans Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005, pp. 2090 –2095.
- [37]: K. Tan et S. Islam, "Stratégies de contrôle optimales dans la conversion d'énergie du système d'éolienne PMSG sans capteurs mécaniques", Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 19, non. 2, p. 392–399, 2004.
- [38]: B. S. Borowy et Z. M. Salameh, "Réponse dynamique d'un système de conversion d'énergie éolienne autonome avec stockage d'énergie par batterie à une rafale de vent", Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 12, non. 1, p. 73–78, 1997.

BIBLIOGRAPHIE

- [39]: R. Melício, V. M.Mendes et J. P. .Catalão, "Éoliennes avec générateur synchrone à aimant permanent et convertisseurs pleine puissance : modélisation, contrôle et simulation."
- [40]: M. Martino et intro groupe-736 Université d'Aalborg, Amélioration de l'efficacité des onduleurs photovoltaïques. 2010.
- [41]: Z. Chu, "Modélisation et analyse basées sur PSCAD/EMTDC d'un micro-réseau avec des sources d'énergie renouvelables", Texas A&M University, 2010.
- [42]: K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino et M. Osakada, « Suivi de la puissance photovoltaïque maximale : un algorithme pour les conditions atmosphériques en évolution rapide », dans Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, 1995, vol. 142, p. 59–64.
- [43]:A. Oi, "Conception et simulation d'un système de pompage d'eau photovoltaïque", California Polytechnic State University, 2005.
- [44]: G. R. Simader, R. Krawinkleret G. Trnka, « Micro CHP systems: state-of-the-art », Final Report, Deliverable, vol. 8, 2006.
- [45]: D. N. Gaonkar et S. Nayak, « Modélisation et analyse des performances d'un système de génération distribuée basé sur des microturbines, « une revue » », dans Energytech, 2011 IEEE, 2011, pp. 1–6.

ملخص:

كانت هناك مبادرات عالمية لتعزيز أنظمة الطاقة المتعددة ذات الابتكاء الذاتي و قد أدت هذه المبادرة إلى تطوير أنظمة الشبكة الذكية MICROGRIDS القادرة على توفير توليد الكهرباء الذاتي باستخدام مصادر الطاقة المتعددة الهجينة والأكثر استخداما هي الطاقة الشمسية PV وطاقة الرياح WT كل من مصدرا لطاقة هذه متقطعة بطبيعتها لذلك فان استخدام نظام تخزين الطاقة ESS هو الحل المناسب. تساعد الشبكات الصغيرة في تغيير المرونة و الموثوقية و تحسين التكلفة و برامج موازنة الشبكة إلا أن أنظمة توزيع الشبكة تعاني من خسائر مادية خصوصا في الاقتصاد الرقمي الحديث. أصبح الطلب على جودة الطاقة و موثوقيتها من طرف العملاء التجاريين هدف أساسى لأجل حماية أجهزة الكمبيوتر وأنظمة البيانات و يتضح ذلك من خلال الاستثمار في إمدادات الطاقة الغير منقطعة UPS. الهدف من دراستنا هو تحديد أهمية التحكم الذكي في الشبكة الصغيرة ولهذا قمنا بتقسيم أطروحتنا إلى أربع فصول. في الفصل الأول يتم عرض نبذة عامة عن الطاقات المتعددة بأنواعها المختلفة. كما قمنا في الفصل الثاني دراسة مفصلة عن الشبكات الصغيرة على نطاق عالمي. وفي الفصل الثالث يتم عرض وحدات DER بأنواعها المختلفة و النموذج المختار لكل وحدة و طرق التحكم المختلفة لزيادة الطاقة المحقونة لموازنة تدفق الطاقة ومستوى الجهد ل MICROGRIDS . و الفصل الرابع يوضح سلوك النظام في أربع سيناريوهات بواسطة MATLAB/SIMULNIK. وأخيرا يمكن القول أن التحكم الذكي للأنظمة الموزعة قد تم اختباره.

Résumé

Il y a eu des initiatives mondiales pour promouvoir des systèmes d'énergie renouvelable autosuffisants, et cette initiative a conduit au développement de systèmes de réseau intelligent MICROGRIDS capables de fournir l'autoproduction d'électricité à l'aide de sources d'énergie renouvelables hybrides et les plus largement utilisées sont le solaire photovoltaïque et l'éolien (énergie WT). Chacune de ces sources d'énergie est de nature intermittente, le système de stockage d'énergie ESS est la bonne solution. Les petits réseaux contribuent à modifier les programmes de flexibilité, de fiabilité, d'optimisation des coûts et d'équilibrage des réseaux, mais les systèmes de distribution en réseau subissent des pertes financières, en particulier dans l'économie numérique moderne. Ceci est démontré par l'investissement dans les onduleurs. Le but de notre étude est de déterminer l'importance de contrôle intelligent dans le petit réseau et pour cela nous avons divisé notre mémoire en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, un aperçu des différents types d'énergies renouvelables est présenté. Nous avons également présenté dans le deuxième chapitre une étude détaillée des micro-réseaux à l'échelle mondiale. Dans le troisième chapitre, les unités DER de différents types, le modèle choisi pour chaque unité, et les différentes méthodes de contrôle pour augmenter la puissance injectée pour équilibrer la le flux de puissance et le niveau de tension des MICROGRIDS sont présentés. Le quatrième chapitre montre le comportement du système dans quatre scénarios par MATLAB/SIMULNIK. Enfin, on peut dire que le contrôle intelligent des systèmes distribués a été testé.

Abstract:

There have been global initiatives to promote self-sufficient renewable energy systems, and this initiative has led to the development of MICROGRIDS smart grid systems capable of providing self-generation of electricity using energy sources hybrid renewable and the most widely used are solar photovoltaic and wind. WT energy Each of these energy sources is intermittent in nature, the ESS energy storage system is the right solution. Small networks are helping to change programs for flexibility, reliability, cost optimization and network balancing, but networked distribution systems suffer financial losses, especially in the modern digital economy. This is demonstrated by investment in inverters. The purpose of our study is to determine the importance of intelligent control in the small network and for this we have divided our memoir into four chapters. In the first chapter, an overview of the different types of renewable energies is presented. We also presented in the second chapter a detailed study of MicroGrids on a global scale. In the third chapter, the DER units of different types, the model chosen for each unit, and the different control methods to increase the power injected to balance the power flow and voltage level of the MICROGRIDS are shown. The fourth chapter shows the behavior of the system in four scenarios by MATLAB/SIMULNIK Finally, it can be said that the intelligent control of distributed systems has been tested.