الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic OF Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي-تبسة
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa
كلية العلوم و التكنولوجيا

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLES

THEME

CONTROLE DES MICRO-RESEAUX PAR LE BIAIS DE METHODES BASEES SUR L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE (MACHINE LEARNING).

Présenté par le binôme :

- Djedaiet Kaouthar
- Hamida Istabrak

Devant le jury :

- Mr. Djalel Dib	Pr	**Président**
- Mr. Abdelhakim Bendakir	MCB	**Encadreur**
- Mr. Mohamed El Saleh Djabar	MCA	**Examinateur**

2023/2024


بسم الله الرحمن الرحيم

Abstract

Electrical lines, substations, as well as transformers are part of the electrical network. Therefore, it is difficult to implement a comprehensive control strategy on existing electricity networks. One solution is to divide the network into interconnected subgroups known as microgrids, which is an interconnected structure of loads and local production that can be self-contained (island) or connected to the electricity grid (connected). To achieve this, hierarchical control strategy consisting of 3 levels was followed for each role and function, while integrating neural networks because they have a strong role in modeling and controlling complex systems

الملخص

تعتبر الخطوط الكهربائية والمحطات الفرعية، وكذلك المحولات جزءا من الشبكة الكهربائية. ولذلك فمن الصعب تنفيذ استراتيجية تحكم شاملة على شبكات الكهرباء الحالية. يتمثل أحد الحلول في تقسيم الشبكة الى مجموعات فرعية مترابطة تعرف باسم الشبكات الصغيرة، وهي عبارة عن بنية مترابطة من الاحمال والانتاج المحلي التي يمكن ان تكون قائمة بذاتها (وضع الجزيرة) او متصلة بشبكة الكهرباء (متصلة) ولتحقيق ذلك تم اتباع استراتيجية التحكم الهرمي الذي يتكون من 3 مستويات لكل دوره ومهامه ,مع دمج الشبكات العصبية لما لها من دور قوي في نمذجة الانظمة المعقدة والتحكم فيها

Remercîments

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant **BENDAKIR ABDELHAKIM** pour l'orientation, la confiance, la patience.

Un merci spécial au professeur **LEMITA ABDALLAH** pour sa coopération avec nous. Il nous a beaucoup apporté et grâce à lui, nous avons parfaitement terminé notre travail

Mes vifs remerciements vont à Mr. D. Djalel professeur au département de génie électrique à l'université de Tébessa pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

Nos vifs remerciements, également et sincèrement à Mr. M^{ed}.S. Djabar, maître de conférence à l'université de Tébessa pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de le juger.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

First and foremost, I would like to dedicate this work to myself, above all, for being strong and dedicated and not giving up in the hardest times.

To my beloved mother, *who has always been my anchor and ray of hope, and never doubted me or my potential, and without whom I wouldn't be who I am today. I hope you will be able to witness all of my successes, for they will all be dedicated to you, always.*

To my beloved father, *who has always been a great listener and supporter. I wouldn't have gone through half the challenges if it weren't for his guidance and love. May you always be my side at the most critical points in my life, for I only have the courage to make big decisions when you are with me.*

To my silbings *whom I love so much, my brother* ***abd-el fatah****, my sister* ***anfal****,and my little sweetheart* ***anis*** *with whom I shared my most memorable moments.*

To nesrine *who listened to me talk nonstop about my thesis and never complained of my obsession Nor my complaints whenever a simulation fails.*

To all who truly love me ….

Kawther djedaiet

Dédicace

***A mes chers parents**, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, Pour leur patience illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices*

***À ma chère sœur** « Malak » et mon frère « Mouhamed »*

*Une dédicace particulière à mon partenaire dans ce travail « **Kaouther** »*

***À mes amis** « Fatima, zineb, rahma et aziza »*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.

Istabrak hamida

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MICRO RESEAUX

Figure I. 1: schéma d'un MG. 4
Figure I.2 : Architecture générale d'un microgrid en mode îlot. 4
Figure I.3 : Architecture générale d'un microgrid en mode connecté au réseau. 5
Figure I.4 : La structure des micro-réseaux DC, AC et hybrides AC/DC. 5
Figure I.5 : Caractéristiques de la production décentralisé. 11
Figure I.6 : Une installation photovoltaïque 12
Figure I. 7 : centrales éoliennes 12
Figure I. 8 : Scénarios de pannes externes et internes dans un micro-réseau. 16
Figure I. 9: Les 4 étapes successives dans la gestion d'un défaut 17

CHAPITRE II : METHODES DE CONTROLE D'UN MICRO-RESEAU

Figure II.1 : L'architecture de contrôle du micro-réseau 20
Figure II.2 : Architecture de base d'un contrôleur central de MG. 22
Figure II 3 : Classification des méthodes de contrôle MG en fonction de leurs formations techniques. 23
Figure II.4 : Contrôle hiérarchique du micro-réseau. 24
Figure II.5 : Principe du contrôle secondaire. 25
Figure II.6 : Principe du contrôle tertiaire 25
Figure II.7 : Stratégie de contrôle du statisme. 26
Figure II.8 : contrôle maître-esclave 27
Figure II.9 : Cadre de l'architecture MAS. 28
Figure II.10 : Schéma général d'un PV avec un système MPPT. 28
Figure II.11 : Système de contrôle centralisé d'un 'MG'. 31
Figure II.12 : Système de contrôle distribué d'un 'MG'. 32

Figure II.13 : Architecture générale du contrôle à logique floue (FLC)..... 34
Figure II.14 : Architecture des réseaux de neurones : (a) réseau de neurones monocouche ; (b) réseau neuronal multicouche. 34
Figure II.15 : Structure générale de l'algorithme génétique. 35
Figure II.16 : Optimisation des essaims de particules. 36
Figure II.17 : Structure générale des contrôleurs PID. 37
Figure II.18 : Schéma d'apprentissage par renforcement. 39
Figure II.19 : Architecture générale du système prédictif. 39

CHAPITRE III : MODELISATION ET CONTROLE D'UN MICRO RESEAUX

Figure III. 1: Contrôle hiérarchique à plusieurs niveaux pour micro-réseau AC..... 42
Figure III. 2: Diagramme schématique du contrôle hiérarchique du micro-réseau AC..... 43
Figure III. 3: Paradigme de contrôle des convertisseurs alimentés par le réseau..... 44
Figure III. 4: Paradigme de contrôle des convertisseurs supportant le réseau. 45
Figure III. 5: Contrôle primaire d'un convertisseur d'alimentation en réseau 45
Figure III. 6: La structure de bloc de calcul des puissances active et réactive [25] 46
Figure III. 7: Contrôleur de puissance..... 46
Figure III. 8: Contrôleur de courant 47
Figure III. 9: Schéma de circuit du convertisseur de puissance formant réseau en mode îloté..... 48
Figure III. 10: Contrôle de tension et de courant du convertisseur de puissance en mode îloté 48
Figure III. 11: (a) Modèle équivalent de deux onduleurs connectés en parallèle au point de bus de couplage commun, (b) le diagramme des phaseurs 49
Figure III. 12: Schéma fonctionnel du contrôle de statisme conventionnel. 50
Figure III. 13: (a) P-ω ET (b) Q-E droops..... 51
Figure III. 14: Un neurone biologique..... 53
Figure III. 15: Modèle du neurone artificiel..... 54
Figure III. 16: Réseau de neurones monocouche 56
Figure III. 17: Réseau multicouche 57
Figure III. 18: Réseau multicouche classique 58
Figure III. 19: Réseau à connexions locales. 58

Figure III. 20: Réseau à connexions récurrentes 58
Figure III. 21: réseau à connexions complète..... 59
Figure III. 22: Bloc de l'apprentissage supervisé..... 60
Figure III. 23: Bloc de l'apprentissage non supervisé..... 60

CHAPITRE IV : APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES AU CONTROLE DES MICRO RESEAUX

Figure IV. 1: Structure de Micro-réseau 64
Figure IV. 2: Modèle de microgrid dans SIMULINK..... 65
Figure IV. 3: Contrôle primaire de l'onduleur dans SIMULINK 66
Figure IV. 4: Système de contrôle primaire 66
Figure IV. 5: Les caractéristiques de statisme du contrôle de l'onduleur..... 67
Figure IV. 6: Contrôle de statisme 67
Figure IV. 7: Sous-système de mesure..... 68
Figure IV. 8: Régulateur de tension 68
Figure IV. 9: Régulateur de courant..... 69
Figure IV. 10: Génération de signal de référence de tension et PWM..... 70
Figure IV. 11: Sous-système de contrôle secondaire 71
Figure IV. 12: Modélisation neuronale 71
Figure IV. 13: Les entrée et la sortie d'un système de régulation de fréquence (fref)..... 72
Figure IV. 14: L'erreur entre fpcc et fnom..... 72
Figure IV. 15: Le trainage de réseaux de neurone 73
Figure IV. 16: Structure d'un réseau neurone avec une seule couche cachée 73
Figure IV. 17: Le nombre de neurones ainsi la fonction d'activation utilisés dans la couche cachée 74
Figure IV. 18: Le nombre de neurones ainsi la fonction d'activation utilisés dans la couche de sortie 74
Figure IV. 19: Sortie du réseau de neurone avec trainage..... 75
Figure IV. 20: Les entrée et la sortie d'un système de régulation de tension (Vref) 76
Figure IV. 21: L'erreur entre Vpcc et Vnom..... 76
Figure IV. 22: Sortie du réseau de neurone avec trainage..... 77
Figure IV. 23: La puissance active et réactive de PCC..... 79
Figure IV. 24: La fréquence de PCC..... 79

Figure IV. 25: La tension PCC 80
Figure IV. 26: La puissance active et réactive de les 2 onduleur 80

Liste des tableaux

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MICRO RESEAUX

Tableau I. 1 : les avantage et les inconvénients du micro-réseau AC. 6
Tableau I. 2 : les avantage et les inconvénients du micro-réseau DC. 7
Tableau I. 3 : Comparaison des étapes de conversion des micro-réseaux AC et DC..... 7
Tableau I.4 : Comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents. 14

CHAPITRE II : METHODES DE CONTROLE D'UN MICRO-RESEAU

Tableau II.1 : Résumé des méthodes conventionnelles de contrôle dans le microgrid. 29
Tableau II.2 : la différence entre le contrôle centralisé, décentralisé et distribué 33

CHAPITRE III : MODELISATION ET CONTROLE D'UN MICRO RESEAUX

Tableau III. 1: Compatibilité entre le neurone et un model artificiel 54
Tableau III. 2: Fonctions de transfert f(x) 56
Tableau III. 3: Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurone 61

CHAPITRE IV : APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES AU CONTROLE DES MICRO RESEAUX

Tableau IV. 1: Les paramètre de block ANN 1 75
Tableau IV. 2: Les paramètre de block ANN 2 78
Tableau IV. 3: Paramètres du modèle de simulation 79

Liste d'abréviations

DC : Direct current "Courant continu"

AC : Alternating current "Courant alternatif"

MG : Microgrid "Micro-réseau"

GED : Distributed energy resources "Ressources énergétiques distribuées"

SSE : 'Energy Storage system' Système de stockage d'énergie

CVC : Systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation

DG : Générations de Distribution

CG : Génération conventionnelle

PV : Photovoltaïque

CHP : Production combinée de chaleur et d'électricité

DR : Distributed Resources "Ressources distribuées"

DSM : Demand Management System "Système de Gestion de la Demande"

SS : Static switch "Commutateur statique"

MC : Contrôleur de microsource

LC : Contrôleur de charge

MGCC : Contrôleur central de micro-réseau

DMS : Distribution Management System "Système de gestion de la distribution"

IA : Intelligence artificielle

PQ : Puissance active et réactive

EMS : Energy management system "Système de gestion de l'énergie"

MAS : Multi-agent system "Système multi-agents"

MPPT : Maximum power point tracking "Suivi du point de puissance maximale"

DER : Distributed energy resource "Ressource énergétique distribuée"

MS : Micro-sources

RES : Sources d’énergies renouvelables

FLC : Fuzzy Logic Control "Contrôle de logique floue"

GA : Genetic algorithm "Algorithme génétique"

PSO : Particle swarm optimization "Optimisation des essaims de particules"

PID : Proportionnel-intégral-dérivé

MPC : Modèle de contrôle prédictif

PCC : Point de couplage commun

PI : Proportionnel –intégral

PWM : Pulse Width Modulation "Modulation de largeur d'impulsion"

PLL : Phase Lock Loop "Boucle de verrouillage de phase"

Liste de matières

Abstract ……...I
Remerciements ……..II
Dédicace ……...III
Liste des figures ……V
Liste des tableaux ……..VIII
Liste des abréviations ……...IX
Liste de matières ……...XI
Introduction générale ……..1

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MICRO RESEAUX

I.1/- Introduction 3
I.2/- Définition d'un micro réseaux 3
I.3/- Fonctionnement du micro réseau 4
I.3.1/- Les Microgrids en mode îlot 4
I.3.2/- Les Microgrids en mode connecté au réseau 5
I.4/- Topologies de micro réseaux 5
I.4.1/- Micro-réseaux alternatifs (AC) 6
I.4.2/- Micro-réseau à courant continus (DC) 6
I.4.3/- Micro-réseau hybride (AC-DC) 8
I.5/- Les objectifs d'un microgrid 8
I.6/- Classification des micro réseaux intelligents 8
I.7/- Les avantages des microgrid 9
I.8/- Défis techniques sur les Microgrids 10
I.9/- Les générations de distribution (DG) 10
I.9.1/- L'énergie solaire photovoltaïque (PV) 11
I.9.2/- L'énergie éolienne 12
I.9.3/- Micro-turbines à gaz 12
I.9.4/- Batteries de stockage d'énergie 13

I.9.5/- Générateurs à combustion (Diesel, gaz naturel, biogaz) 13
I.9.6/- Cogénération (CHP) 13
I.10/- Comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents 13
I.11/- Les perturbations dues par les microgrids 14
I.12/- Protection des micro réseaux 15
I.12.1/- Gestion globale d'un défaut dans un micro-réseau 16
I.12.2/- Principales méthodes de détection et de localisation des défauts 17
I.13/- Conclusion 18

CHAPITRE II : METHODES DE CONTROLE D'UN MICRO-RESEAU

II.1/- Introduction 19
II.2/- Contrôle des micro réseaux 19
II.2.1/- Couche de répartition du réseau de distribution 19
II.2.2/- Architecture de contrôle d'un micro réseau 20
II.2.2.1/- Contrôleurs locaux 20
II.2.2.2/- Contrôleurs globaux 21
II.3/- Méthodes de contrôle des micro réseaux 22
II.4/- méthodes de contrôle conventionnelle dans les micro réseaux 23
II.4.1/- Méthode de contrôle du statisme (droop control) 26
II.4.2/- Impédance de sortie virtuelle 26
II.4.3/- Technique de contrôle maître-esclave 26
II.4.4/- Contrôle basée sur un système multi-agents 27
II.4.5/- Contrôle de suivi du point de puissance maximale (MPPT) 28
II.5/- méthodes de contrôle avancée 30
II.5.1/- Contrôleur de supervision MG 30
II.5.1.1/- Contrôle centralisées 30
II.5.1.2/- Contrôle décentralisées 31
II.5.1.3/- Contrôle distribuées 31
II.5.2/- Techniques intelligentes 33
II.5.2.1/- Contrôle à logique floue (FLC) 33
II.5.2.2/- Les réseaux de neurones 34
II.5.2.3/- Algorithme génétique (GA) 35
II.5.2.4/- Optimisation des essaims de particules 36
II.5.3/- Techniques adaptatives 37

II.5.3.1/- Contrôleur (PID) adaptatif 37
II.5.3.2/- Contrôleur de mode coulissant adaptatif 38
II.5.3.3/- Apprentissage renforcé 38
II.5.3.4/- Modèle de contrôle prédictif 39
II.6/- Conclusion 40

CHAPITRE III : MODELISATION ET CONTROLE D'UN MICRO RESEAUX

III.1/- Introduction 41
III.2/- Contrôle hiérarchique des AC microgrids 41
III.3/-Modélisation et control d'un micro réseau connecte au réseau 43
III.3.1/- Commande de convertisseur de puissance 43
III.3.1.1- Mode d'alimentation du réseau (grid-feeding mode) 43
III.3.1.2- Mode de support du réseau (grid-supporting mode) 44
III.3.2/- Contrôle du niveau primaire dans le mode d'alimentation du réseau 45
III.4/- Modélisation et control d'un micro réseau isolée au réseau 47
III.4.1/ Mode de formation du réseau (grid-forming) 47
III.5 /- contrôle du statisme (Droop control) 49
III.6.1- Notion de base sur les réseaux de neurones 52
III.6.1.1- Le neurone biologique 52
III.6.1.2- Le neurone formel 53
III.6.2- Fonctions d'activation 54
III.6.2.1- Fonction à seuil 55
III.6.2.2- Fonction linéaire : 55
III.6.2.3- Fonction sigmoïde : 55
III.6.3- Architectures des réseaux de neurones 56
III.6.3.1- Réseaux monocouche 56
III.6.3.2- Réseaux multicouches 56
III.6.4- Apprentissage des réseaux de neurones 59
III.6.4.1- Apprentissage supervise 59
III.6.4.2- Apprentissage non supervisé 60
III.6.5- Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurone 60
III.7/- Conclusion 61

CHAPITRE IV : APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES AU CONTROLE DES MICRO RESEAUX

IV.1/- Introduction 63
IV.2/- Model de microgrid étudié 63
IV.3/- Modèle d'onduleur 65
IV.3.1-Contrôle de statisme : 67
IV.3.2-Mesures : 67
IV.3.3-Régulateurs de tension : 68
IV.3.4-Régulateurs de courant : 69
IV.3.5-Génération Vref : 69
IV.4/-Contrôle secondaire 70
IV.5/- Implémentation de réseaux de neurone 71
IV.5.1/- Bloc ANN pour la régulation de fréquence (f_{ref}) 72
IV.5.2/- Bloc ANN pour la régulation de tension (V_{ref}) 75
IV.6/ Applications sur micro-réseau 78
IV.7/- Conclusion 81
Conclusion general 82
Références Bibliographique 84
ANNEXE 87

Introduction générale

Introduction générale

L'optimisation de la production et de la distribution d'énergie électrique génère par multitudes sources, notamment en relevant les défis posés par la transition vers des sources d'énergie plus propres et renouvelables, est devenue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale. Cela est dû à la demande croissante d'énergie, avec une infrastructure vieillissante et des marchés énergétiques de plus en plus complexes, l'optimisation devient essentielle pour assurer un approvisionnement fiable, économique et respectueux de l'environnement.

Les méthodes avancées telles que l'intelligence artificielle, l'analyse des données et les réseaux intelligents jouent un rôle crucial dans cette transformation, permettant une gestion plus efficace et dynamique des réseaux électriques pour répondre aux besoins actuels et futurs de la société.

Les micro-réseaux représentent une innovation majeure dans le domaine de la distribution d'énergie électrique. Composés de sources d'énergie distribuées, de charges locales et de systèmes de stockage, ces réseaux autonomes offrent une solution flexible et résiliente pour répondre aux besoins énergétiques des communautés locales, des zones urbaines densément peuplées aux zones rurales isolées. Les micro-réseaux permettent une intégration harmonisée des énergies renouvelables telles que le solaire et l'éolien, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Leur architecture décentralisée et leur capacité à fonctionner de manière autonome ou à s'intégrer dans des réseaux électriques plus vastes en font une solution polyvalente et adaptable pour répondre aux défis énergétiques contemporains. Toutefois, pour exploiter pleinement leur potentiel, il est impératif de développer des méthodes de contrôle efficaces et adaptatives.

Le présent mémoire se concentre sur l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning) pour le contrôle des micro-réseaux. L'objectif principal est d'explorer comment ces méthodes peuvent être appliquées pour améliorer la gestion et l'efficacité opérationnelle des micro-réseaux, tout en garantissant la stabilité du système et en minimisant les coûts associés. Cette approche repose sur l'idée que les techniques d'apprentissage automatique peuvent apprendre à partir de données passées et prendre des décisions adaptatives en temps réel, ce qui les rend particulièrement adaptées à la gestion dynamique des micro-réseaux.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur le contrôle d'un micro-réseau. Pour atteindre notre objectif nous proposons de le décomposer de la façon suivante :

Le premier chapitre intitulé ‘‘Généralités sur les micro-réseaux’’ fournira une vue d'ensemble approfondie des micro-réseaux. Il commencera par définir un micro-réseau, en mettant en lumière sa structure, ses composants et ses caractéristiques clés. Seront également abordées les différentes configurations possibles des micro-réseaux, telles que les micro-réseaux AC et DC, ainsi que les micro-réseaux hybrides. En outre, ce chapitre explorera les avantages potentiels des micro-réseaux, notamment en termes de résilience, de réduction des pertes d'énergie et d'intégration des énergies renouvelables.

Dans le deuxième chapitre intitulé ‘‘Méthodes de contrôle d'un micro-réseau’’ examinera en détail les différentes méthodes de contrôle utilisées dans les micro-réseaux. Il débutera par une analyse des approches conventionnelles de contrôle, telles que la régulation de tension, la gestion de la charge et la gestion de la puissance. Ces méthodes traditionnelles seront ensuite comparées aux approches innovantes basées sur l'apprentissage automatique. Seront discutées les principales techniques d'apprentissage automatique utilisées dans le contrôle des micro-réseaux, telles que les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques et les algorithmes d'apprentissage par renforcement.

Ensuite, le troisième chapitre ‘‘Modélisation et contrôle d'un micro réseaux’’ présentera, le contrôle hiérarchique d'un microgrid AC avec la modélisation et le contrôle dans deux mode : le mode connecté avec le réseau et le mode isolée en mentionnant les types de contrôle des convertisseurs de puissance dans les deux cas précédents en termes de structure générale, leur régulation de la tension et courant. Ce contrôle sera réalisé dans ce travail par la méthode des réseaux de neurones, dans le but de l'intégrer dans les microgrid, ou son principe de fonctionnement est bien illustrer dans ce chapitre.

Le dernier chapitre ‘‘Application des réseaux de neurones au contrôle des micro-réseaux’’ consacré à l'application via Matlab- Simulink des réseaux de neurones à un micro réseau isolé a été réaliser, en adoptant le contrôle hiérarchique (primaire et secondaire). Les résultats obtenus sont confrontés à ceux que nous obtenons en utilisant ma méthode de contrôle PI modifie.

Enfin, ce travail termine par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I : Generalite sur les micro reseaux

I.1/- Introduction

Dans un monde où la demande en énergie augmente et où les préoccupations environnementales sont de plus en plus pressantes, les microgrids se positionnent comme une solution prometteuse pour répondre aux défis énergétiques du 21e siècle. Les microgrids, ou micro-réseaux, sont des systèmes électriques locaux qui peuvent fonctionner de manière autonome ou se connecter au réseau électrique principal. Ils intègrent une diversité de sources d'énergie, telles que le solaire, l'éolien, la biomasse et les générateurs conventionnels, associées à des technologies de stockage et de gestion avancées.

Les microgrids représentent une voie prometteuse vers un avenir énergétique plus durable, résilient et équitable. En continuant à investir dans la recherche, le développement et le déploiement de cette technologie innovante, nous pouvons façonner un monde où l'accès à une énergie fiable et propre est une réalité pour tous.

I.2/- Définition d'un micro réseaux

Un micro-réseau est un système énergétique local qui intègre plusieurs sources d'énergie telles que des panneaux solaires, des éoliennes, des générateurs diesel, des petites turbines à gaz, des piles à combustible, etc. Ces sources peuvent être renouvelables ou non. Contrairement aux réseaux électriques traditionnels, qui sont généralement centralisés et dépendent d'une seule source d'énergie principale.

Les micro-réseaux sont conçus pour fonctionner indépendamment ou en mode connecté au réseau principal, en fonction des besoins et des conditions locales, pour fournir une énergie électrique sûre, fiable et durable aux communautés locales, aux installations industrielles et aux zones isolées.

Ils peuvent être équipés de batteries de stockage d'énergie, de super condensateurs ou d'autres dispositifs de stockage pour capter et stocker l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelables et la redistribuer si nécessaire. Le stockage permet d'équilibrer l'offre et la demande d'électricité et d'assurer la stabilité du micro-réseau.

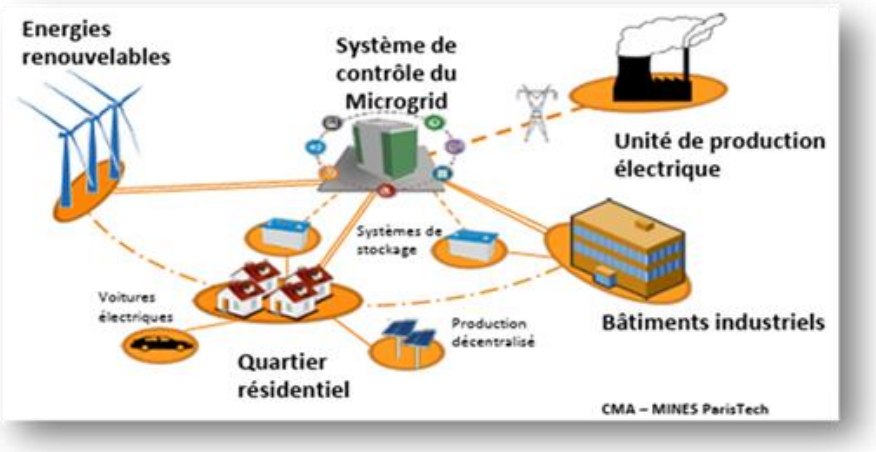


Figure I. 1: schéma d'un MG [1]

I.3/- Fonctionnement du micro réseau

Le micro réseau est destiné à fonctionner dans les deux modes suivantes :

I.3.1/- 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 Ils doivent donc assurer seuls leur gestion d'énergie 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,
- ✓ Des zones où le réseau électrique local est très instable,
- ✓ Des endroits où l'autosuffisance en électricité est essentielle.

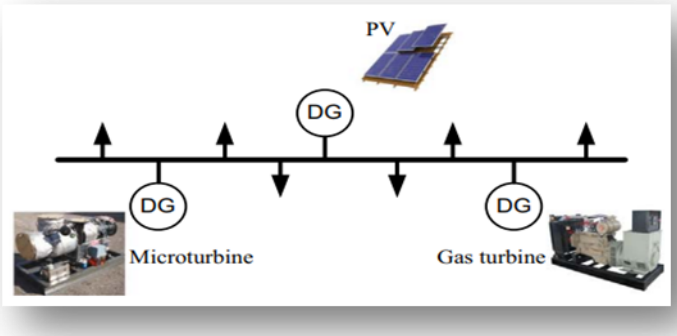


Figure I.2 : Architecture générale d'un microgrid en mode îlot. [2]

I.3.2/- Les Microgrids en mode connecté au réseau

Les micros réseaux connectés sont directement reliés au réseau local de distribution d'électricités du pays, ils ont l'avantage de pouvoir produire de l'électricité du réseau électrique local ou on peut le définir comme une (ou plusieurs) connexion(s) avec le réseau principal appelée PPC (Point of Common Coupling = Point de Couplage Commun) avec un commutateur connexion/déconnexion. [3]

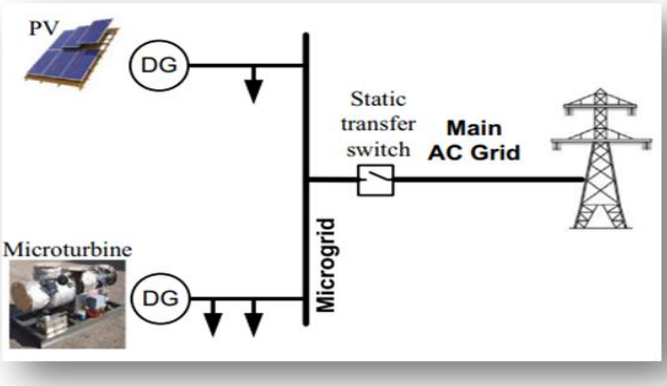


Figure I.3 : Architecture générale d'un microgrid en mode connecté au réseau. [2]

I.4/- Topologies de micro réseaux

Dans une autre classification, comme mentionné plus haut, les micro-réseaux sont divisés en trois topologie Le choix de toute topologie de micro-réseaux donnée ci-dessous dépend de facteurs techniques, géographiques et économiques à l'endroit d'installation, Selon le mode d'intégration des différentes parties constituant un micro-réseau

On distingue les topologies à bus DC **(A),** à bus AC **(B)** et à bus hybride (AC-DC) **(C)**

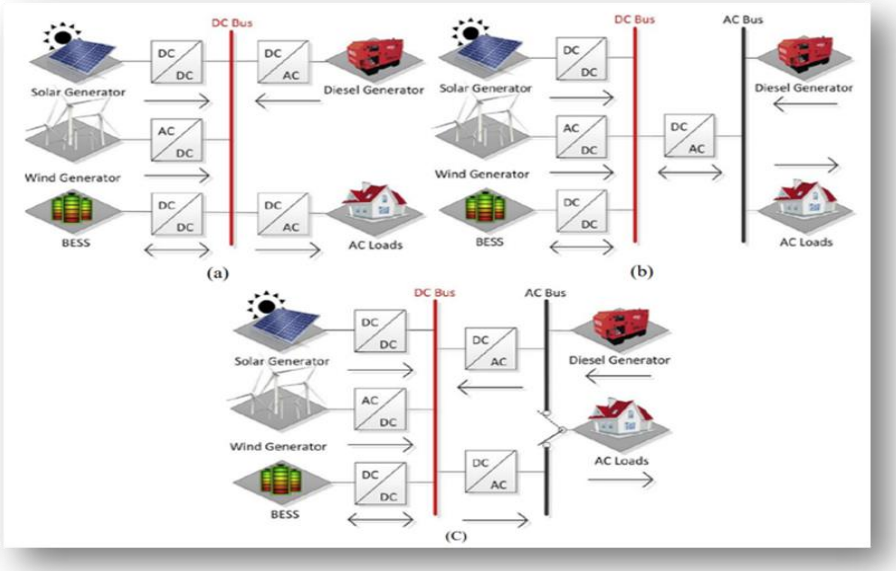


Figure I.4 : La structure des micro-réseaux DC, AC et hybrides AC/DC. [4]

I.4.1/- Micro-réseaux alternatifs (AC)

Le micro-réseau à courant alternatif est le type le plus courant des 'MG' en raison de la mise en œuvre directe des sources d'énergie distribuée dans le système

Les sources de production d'énergie, les dispositifs de stockage et les autres équipements du système sont reliés au bus AC pour répondre aux demandes de charge AC. Ces micro-réseaux peuvent être facilement intégrés aux réseaux électriques existants sans nécessiter d'approche de contrôle spécifique.

Avantages du micro-réseau AC	Inconvénients du micro-réseau AC
(a) Utilisation de transformateurs à haut rendement. À des fins de distribution et pour les charges locales à proximité, la tension des micro-réseaux AC peut être respectivement augmentée et diminuée à l'aide de transformateurs. **(b)** Une tension stable peut être obtenue en gérant indépendamment la puissance réactive. **(c)** En mode connecté au réseau, le micro-réseau AC se déconnectera automatiquement si des conditions de défaut surviennent dans le micro-réseau. Étant donné que la charge CA reçoit une alimentation directe du micro-réseau AC, toute perturbation du réseau principal ne l'affectera pas	**(a)** Pour alimenter des charges CC telles que le chargement de batteries, des ordinateurs, des lampes fluorescentes CC, etc., l'alimentation AC doit être convertie en alimentation CC. Ces conversions entraînent une diminution de l'efficacité. **(b)** L'utilisation de convertisseurs électroniques de puissance provoque l'introduction d'harmoniques dans le réseau principal. **(c)** La sortie CC des sources d'énergie renouvelables doit être convertie en AC à l'aide d'onduleurs, ce qui rend l'interconnexion difficile

Tableau I.1 : les avantages et les inconvénients du micro-réseau AC. [5]

I.4.2/- Micro-réseau à courant continus (DC)

Dans un micro-réseau à CC, un bus 'CC' commun est utilisé pour se connecter au réseau via un convertisseur AC/DC. Le principe de fonctionnement du micro-réseau 'DC' est similaire à celui du micro-réseau 'AC'.

Par rapport au micro-réseau 'AC', le micro-réseau 'DC' est une bonne solution pour réduire les pertes de conversion de puissance car il ne nécessite qu'une seule conversion de puissance pour connecter le bus continu.

Par conséquent, le micro-réseau 'DC' a un rendement supérieur, un coût et une taille de système inférieurs.

En outre, le micro-réseau 'DC' est mieux compatible avec l'intégration des ressources énergétiques distribuées (GED) et offre une meilleure stabilité en raison de l'absence de la puissance réactive.

Avantages d'un micro-réseau DC	Inconvénients d'un micro-réseau DC
(a) La connexion directe d'un système de stockage par batterie à une source d'alimentation de secours est possible. En période de charge de pointe ou en l'absence de générateurs distribués, un système de stockage de secours fournira de l'électricité. **(b)** La connexion directe réduit le besoin de plusieurs conversions de puissance et augmente l'efficacité du système. **(c)** Il permet une connexion facile aux sources d'énergie renouvelables. **(d)** En cas de panne de courant sur le réseau principal CA, la batterie de stockage du micro-réseau CC fournira régulièrement de l'électricité aux charges	**(a)** La plupart des unités de charge dans la configuration actuelle du système électrique nécessitent une alimentation AC. Par conséquent, un réseau de distribution uniquement en courant continu n'est pas pratique. **(b)** Par rapport à un système AC, la transformation de tension dans un système DC est moins systématique. **(c)** L'intégration de générateurs AC nécessite l'utilisation d'un redresseur pour convertir le courant alternatif en courant continu

Tableau I.2 : les avantage et les inconvénients du micro-réseau DC. [5]

La différence entre les étapes de conversion des charges CA et des charges CC est étudiée par de nombreux chercheurs intéressés par la conception de systèmes hybrides d'énergie renouvelable et comparant les avantages du déploiement de la meilleure forme. Par conséquent, il existe différentes étapes de conversion, et celles-ci présentent différents avantages et inconvénients. Le tableau (I.3) présente la comparaison des charges des micro-réseaux AC et DC [5]

Type de MG	Charge DC	Charge AC
DC MG	Conversion unique	Conversions multiples
AC MG	Conversions multiples	Conversion unique

Tableau I.3 : Comparaison des étapes de conversion des micro-réseaux AC et DC

I.4.3/- Micro-réseau hybride (AC-DC)

Le micro-réseau hybride AC/DC est une combinaison de micro-réseaux 'AC' et 'DC' dans le même réseau de distribution, facilitant l'intégration directe de la production décentralisée, du système de stockage d'énergie (SSE) et des charges, comme le montre la figure I.4.

Cette architecture présente les avantages des deux structures, tels que le nombre minimal d'éléments d'interface, une intégration plus facile des 'GED', une réduction des étapes de conversion, des pertes d'énergie et des coûts totaux, ainsi qu'une fiabilité accrue.

Les micro-réseaux hybrides offrent la possibilité d'intégrer des charges de type 'AC' et DC, de sorte que les clients puissent utiliser l'électricité en fonction de leurs besoins.

I.5/- Les objectifs d'un microgrid

L'installation d'un microgrid s'intègre parfaitement dans une démarche de transition énergétique et permet de piloter l'énergie le plus efficacement possible.

Voici les possibilités qu'offrent les microgrids :

- **Gestion optimisée de l'énergie:** Les microgrids permettent de gérer intelligemment et de manière autonome l'énergie produite par une production locale d'électricité. À l'aide de logiciels d'optimisation énergétique, il est possible d'analyser les pics et la capacité de production. Mais également d'identifier le besoin du bâtiment et des équipements en énergie (bornes de recharge pour véhicules électrique, CVC…)
- **Réduction des dépenses énergétiques:** Le microgrid permet d'optimiser les factures énergétiques en réduisant la dépendance du bâtiment au réseau général d'électricité
- **Réseau fiable:** En cas d'incident sur le réseau général, certains réseaux locaux peuvent prendre le relai pour alimenter au moins une partie des équipements désignés comme prioritaires.
- **Amélioration de l'empreinte environnementale:** Comme évoqué précédemment, un microgrid entre dans une démarche de transition énergétique et permet au bâtiment de réduire ses émissions de gaz à effets de serre
- **Meilleure couverture énergétique:** L'installation de microgrids non raccordés au réseau est une alternative à l'extension du réseau électrique pour alimenter en électricité les zones isolées. [6]

I.6/- Classification des micro réseaux intelligents

Les projets de Microgrids électriques peuvent être classés en fonction de leur taille, mais 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 :

- Les microgrids des zones commerciales, artisanales ou industrielles : ces zones, fortement consommatrices d'électricité, regroupent entreprises et 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 notamment pour qu'elles soient plus neutres vis-à-vis du réseau de distribution ;

- Les microgrids de campus universitaire : l'enjeu est d'améliorer la gestion énergétique des campus dans un contexte où ceux-ci se doivent d'adopter une démarche de développement durable, telle que prévue par l'article 55 de la loi « Grenelle 1 » du 3 août 2009 ;

- Les microgrids alimentant des zones isolées, non raccordées aux réseaux électriques ou temporairement coupées du réseau pour cause d'aléas (intempéries par exemple) : le déploiement de micro-réseaux leur permet d'exploiter les ressources énergétiques renouvelables locales et de ne plus dépendre seulement de groupes diesel polluants et coûteux.

- Les éco-quartiers : ils fonctionnent peu ou prou sur le même modèle que les microgrids dans les zones commerciales ou industrielles, mais à l'échelle de zones urbaines résidentielles et/ou tertiaires ;

- Les microgrids de « base vie » (camp militaire ou hôpital par exemple) : avec ses propres moyens de production et de stockage et ses propres infrastructures de distribution, le micro-réseau 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. [7]

I.7/- Les avantages des microgrid

L'intégration de cette technologie dans le monde réel a des effets lesquelles

- **Côté technique** : les microgrids offre une gestion optimisée de la production d'électricité d'origine renouvelable à l'échelle locale. Ils peuvent apporter un service auxiliaire au réseau public de distribution, en l'aidant à maintenir la stabilité de la tension et en l'allégeant lorsque coupure du réseau de distribution.
- **Côté économique :** Les microgrids offre également des occasions de l'investissement de réseaux, la proximité entre production et consommation permettant d'optimiser l'acheminement de l'énergie. Ils permettent aussi de réduire le volume des pertes techniques.

- **Côté sociétal :** un microgrid fournit des réponses à l'évolution des besoins fondamentaux d'un territoire en énergie. Il offre notamment un réseau plus sûr et plus fiable en cas d'incident. Parce qu'il s'agit d'un projet local, il facilite également la création d'initiatives et de nouveaux partenariats entre les acteurs locaux.
- **Côté environnemental :** ils permettent de mieux intégrer les énergies de sources renouvelables sur les réseaux et ainsi d'éviter l'installation de centrales thermiques en zones populaire, alors les microgrids sont favorables pour déminé la pollution [8]

I.8/- Défis techniques sur les Microgrids

Malgré les avantages et les besoins que répondent les petits réseaux pour le secteur énergétique dans le monde, ils sont confrontés à certains défis techniques, à savoir :

-La nécessité d'équilibrer la production et les charges, car toute augmentation soudaine des charges peut provoquer une instabilité du réseau en raison de la diminution rapide de la fréquence à l'intérieur du réseau. C'est un autre défi qui résulte de la faible propriété d'inertie des petits réseaux en raison de l'utilisation limitée de machines lourdes contenant des pièces rotatives et pouvant stocker temporairement de l'énergie pour maintenir la stabilité du réseau.

-Assurer la stabilité du microgrid en toutes circonstances, lorsque le microgrid est connecté au réseau principal ou lorsqu'il est déconnecté de celui-ci, lorsqu'il se connecte et se déconnecte : Un contrôleur du micro-réseau permet la connexion au réseau électrique intelligent et assure le contrôle de la tension, du flux d'énergie, le partage ou le délestage des charges, et prend en compte les contraintes du réseau public transmises par un bus de communication [7]

-Assurer également la protection du micro-réseau en cas de défaillances ou de perturbations d'origines diverses sur le réseau principal : en cas de défaut, le micro-réseau doit être découplé rapidement du réseau principal pour protéger ses propres charges. Si la défaillance est imputable au micro-réseau, des fonctions de protection doivent pouvoir détecter les courants de court-circuit, afin d'isoler la partie critique du micro-réseau.

I.9/- Les générations de distribution (DG)

Dans le domaine de la production d'énergie, les méthodes de production conventionnelles (CG) ont toujours été utilisées pour fournir de l'électricité centralisée sur de longues distances. Ces méthodes comprennent les centrales thermiques au charbon, les centrales hydroélectriques, les parcs éoliens et les centrales solaires et nucléaires à grande échelle. [4]

Les Générations de Distribution (DG), également connues sous le terme de générateurs distribués, font référence à des sources d'énergie locales et décentralisées utilisées pour produire de l'électricité à petite échelle dans un micro-réseau. Les générateurs distribués sont essentiels

pour assurer la stabilité, la fiabilité et la résilience des micro-réseaux, en particulier dans les zones éloignées

Ils contribuent également à promouvoir l'utilisation d'énergies renouvelables et à réduire les émissions de carbone associées à la production d'électricité.

Par rapport aux systèmes électriques conventionnels, la production locale réduit considérablement les pertes de transport et les coûts associés



Figure I.5 : Caractéristiques de la production décentralisé. [7]

Les sources de production distribuée englobent à la fois les sources renouvelables et non renouvelables, voici quelques-unes des Générations de Distribution (DG) couramment utilisées dans les micro-réseaux :

I.9.1/- L'énergie solaire photovoltaïque (PV)

L'énergie solaire photovoltaïque est transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque, comme montrée sur (Figure I.6)

Dans un micro-réseau, les installations solaires photovoltaïques peuvent être placées sur les toits des bâtiments ou sur des structures dédiées.

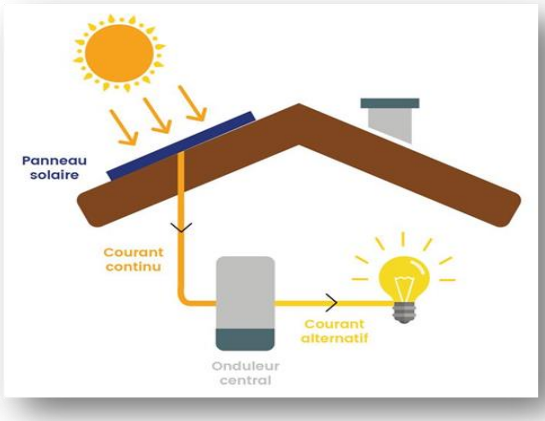


Figure I.6 : Une installation photovoltaïque

I.9.2/- L'énergie éolienne

C'est l'énergie extraite de l'énergie cinétique du vent en utilisant des éoliennes pour produire de l'énergie électrique. Les éoliennes peuvent être installées dans des zones venteuses pour compléter la production d'énergie solaire ou pour diversifier les sources d'énergie du micro-réseau.



Figure I. 7 : centrales éoliennes

I.9.3/- Micro-turbines à gaz

Les micro-turbines à gaz sont des dispositifs de génération d'électricité relativement petits qui utilisent pour convertir l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Elles sont utilisées comme générateurs distribués dans les micro-réseaux et d'autres applications où une source d'énergie compacte et modulaire est nécessaire.

Les micro-turbines à gaz fonctionnent selon le même principe que les turbines à gaz conventionnelles, mais à une échelle beaucoup plus petite, et produisent généralement moins d'émissions polluantes que les générateurs diesel, et elles peuvent fonctionner avec une variété de combustibles y compris le gaz naturel, le biogaz, le propane et même certains liquides, pour

produire de la chaleur. Cette chaleur est ensuite utilisée pour entraîner une turbine à haute vitesse, qui génère de l'électricité à l'aide d'un générateur électrique.

I.9.4/- Batteries de stockage d'énergie

Les batteries de stockage d'énergie jouent un rôle crucial dans les micro-réseaux en permettant de stocker l'électricité produite par les sources d'énergie renouvelable lorsqu'elle est disponible en excès, et de la restituer lorsque la demande est élevée ou lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas une production continue.

En cas de panne du réseau électrique principal, les batteries de stockage d'énergie peuvent assurer une alimentation de secours aux charges critiques dans le micro-réseau. Elles permettent ainsi de réduire l'impact des pannes et d'améliorer la résilience du système. Et en favorisant l'intégration des sources d'énergie renouvelable. Elles contribuent à la transition vers un système énergétique plus durable

I.9.5/- Générateurs à combustion (Diesel, gaz naturel, biogaz)

Les générateurs à combustion fonctionnant au diesel, au gaz naturel ou au biogaz peuvent être utilisés comme sources d'énergie de secours ou de complément dans les micro-réseaux, en particulier lorsque les sources d'énergie renouvelable ne sont pas disponibles ou insuffisantes.

I.9.6/- Cogénération (CHP)

La cogénération, également connue sous le nom de production combinée de chaleur et d'électricité (CHP), permet de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une seule source d'énergie, telle que le gaz naturel ou la biomasse. Cette technologie est parfois utilisée dans les micro-réseaux pour améliorer l'efficacité énergétique.

I.10/- Comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents

Les principales différences entre un réseau électrique intelligent et un réseau électrique classique sont présentées dans le (Tableau I.4)

Réseau traditionnel	microgrid
Electromécanique, état solide	Digitale/Microprocesseur
Une seule direction et communication localisée.	Bidirectionnel, réseau de communication étendue.

Génération centralisée	**Adopte une génération distribuée et mixte (décentralisée)**
Protection, surveillance et contrôle limités	**protection adaptative plus fiable**
Fiabilité estimée	**Fiabilité prédictive du réseau, plus efficacement améliorée**
Besoin en réserve très limité	**Permet la réponse de la charge (DR), et la Gestion du cote charge DSM**
Vérification manuelle des équipements	**Surveillance des équipements à distance**

Tableau I.4 : Comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents. [9]

I.11/- Les perturbations dues par les microgrids

Les microgrids peuvent causer des perturbations dans le réseau électrique, notamment lorsqu'ils sont connectés ou déconnectés du réseau principal, ce qui peut entraîner des déséquilibres offre-demande de puissance et des difficultés de réglage de la fréquence et de la tension

Voici quelques-unes des perturbations courantes associées aux microgrids :

1. Intégration des énergies renouvelables : Les micro-réseaux qui intègrent des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne, peuvent rencontrer des défis liés à l'intermittence de ces sources. Les variations de la production d'énergie solaire et éolienne en fonction des conditions météorologiques peuvent entraîner des fluctuations de tension et de fréquence dans le micro-réseau.
2. Flux d'énergie bidirectionnels : la présence d'unités de production distribuée (DG) dans le réseau à de faibles niveaux de tension peut conduire à des flux d'énergie inversés pouvant entraîner des complexités dans la coordination de la protection, des modèles de flux d'énergie indésirables, une distribution de courant de défaut et un contrôle de tension.
3. Gestion de la charge : Les variations de la demande électrique des charges connectées au micro-réseau peuvent créer des fluctuations de charge et des pointes de demande imprévues. Une gestion inadéquate de la charge peut entraîner des déséquilibres entre l'offre et la demande d'électricité, ce qui peut affecter la stabilité du réseau.

4. Perturbations externes: Les micro-réseaux sont vulnérables aux perturbations externes telles que les pannes de réseau, les variations de tension provenant du réseau électrique principal, les tempêtes, les accidents et les catastrophes naturelles. Ces perturbations peuvent affecter la qualité de l'électricité fournie par le micro-réseau et entraîner des interruptions de service.

Pour atténuer ces perturbations, les microgrids peuvent être équipés de dispositifs de contrôle avancés, de systèmes de stockage d'énergie pour réguler les fluctuations, ainsi que de mécanismes de protection et de gestion de la qualité de l'énergie. Une conception robuste et une planification adéquate peuvent également contribuer à minimiser les perturbations et à assurer la stabilité du microgrid.

I.12/- Protection des micro réseaux

Tout comme un réseau électrique traditionnel, un micro-réseau doit fonctionner de manière sûre et stable et sa protection par relais doit être fiable, rapide, flexible et sélective.

La protection du micro réseau doit réagir lorsque la perturbation se produit dans le réseau public ainsi que dans le micro réseau. Si la perturbation apparaît dans le réseau électrique, la protection doit être déclenchée pour déconnecter le micro-réseau du réseau principal aussi rapidement que possible à l'aide d'un commutateur semi-conducteur rapide appelé commutateur statique (SS). Si le défaut se situe à l'intérieur du micro-réseau, le système de protection isole la plus petite section possible de l'alimentation de distribution pour éliminer le défaut

Dans le système de distribution, la protection classique est basée sur la détection du courant de court-circuit. Les micro-sources à base de machines tournantes à couplage direct augmentent les courants de court-circuit. En revanche, les courants de défaut des onduleurs sont limités par les valeurs nominales des dispositifs au silicium à environ 2 p.u. du courant nominal. Les courants de défaut dans les micro-réseaux insulaires à base d'onduleurs peuvent ne pas être suffisamment importants pour utiliser les techniques traditionnelles de protection contre les surintensités. [10]

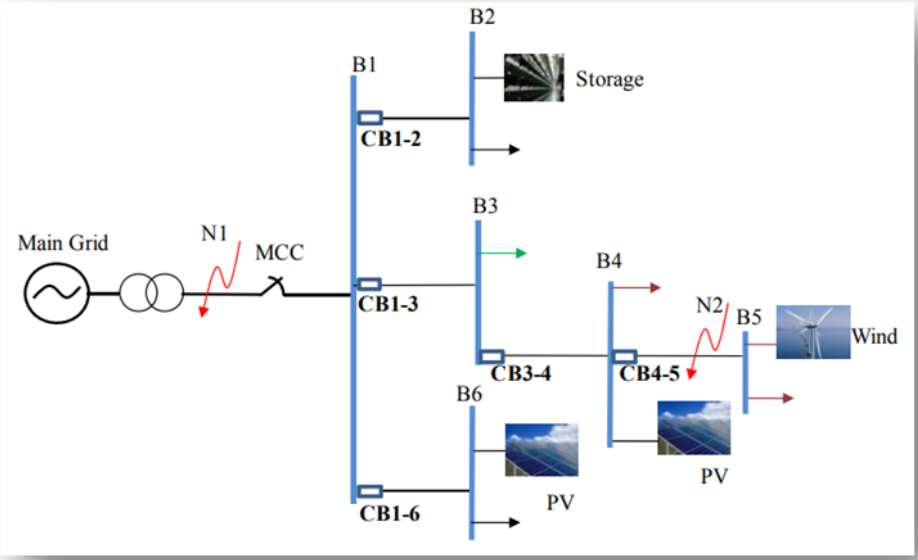


Figure I. 8 : Scénarios de pannes externes et internes dans un micro-réseau. [10]

I.12.1/- Gestion globale d'un défaut dans un micro-réseau

La gestion complète d'un défaut dans un micro-réseau est constituée de quatre étapes successives. [11]

1. Détection et localisation

Le défaut est détecté et localisé le plus vite possible sur le micro-réseau.

2. De-énergisation du système

Les convertisseurs limitent leur courant, les interrupteurs s'ouvrent afin que plus aucun courant ne puisse passer et les circuits auxiliaires dissipent l'énergie du défaut.

3. Isolation du défaut

Le système est ouvert, plus aucun courant ne passe et le défaut est éliminé.

4. Re-énergisation du système

Une fois que plus aucun défaut n'est détecté, les interrupteurs se ferment et les convertisseurs redémarrent afin de revenir au régime permanent.

Les courants et les tensions locales à l'endroit du défaut sont illustrés à la figure I.10

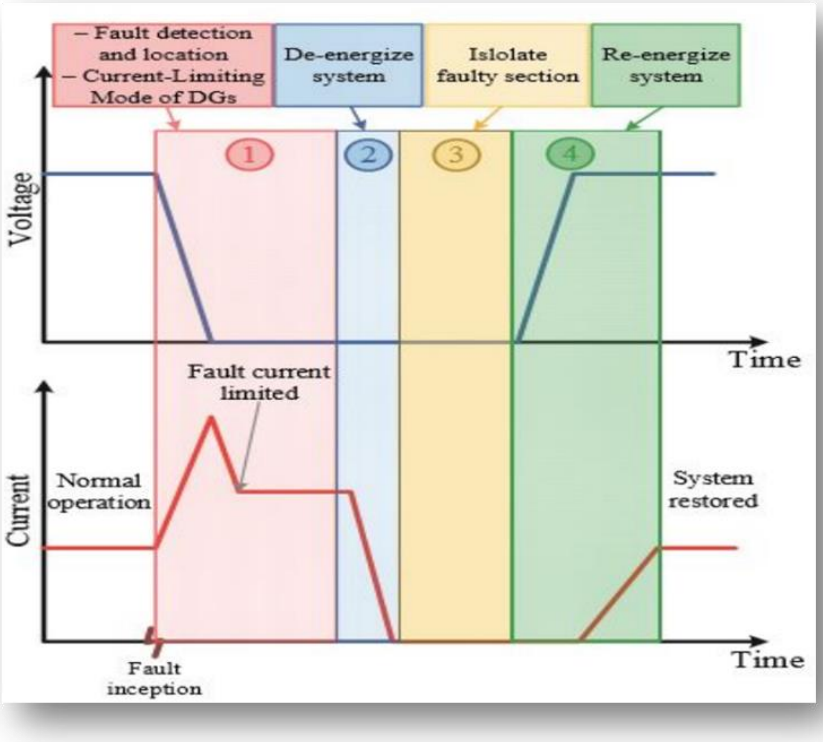


Figure I. 9: Les 4 étapes successives dans la gestion d'un défaut

I.12.2/- Principales méthodes de détection et de localisation des défauts

La localisation rapide et précise des défauts est très importante pour l'économie, la sécurité et la fiabilité du système électrique

Ces méthodes, peuvent être séparées en méthodes actives et passives. Les méthodes actives utilisent les signaux déjà existants, alors que les méthodes Passives utilisent des dispositifs extérieurs qui injectent des signaux supplémentaires afin de détecter les défauts. L'avantage de ces dernières est leur grande précision malgré une complexité plus grande

Nous pouvons encore une fois différencier ces méthodes de détection selon un autre critère, celui de la communication. On les divise donc en méthodes unitaire et non-unitaire.

Les schémas de protection basés sur une détection unitaire permettent d'assurer la protection de zones spécifiques du micro-réseau. En effet, il y a en quelque sorte une communication entre différents points de celui-ci, des mesures sont prises par exemple aux deux extrémités d'une ligne et sont analysées au moyen d'un contrôleur décentralisé.

Les schémas de protection ayant une technique non-unitaire suivent essentiellement une "valeur seuil" pour détecter les défauts et agissent uniquement de manière locale. Ils permettent plus de protéger un dispositif spécifique plutôt qu'une zone. [11]

Les méthodes de détection non-unitaires sont d'une plus grande complexité que les unitaires, mais sont bien souvent plus efficaces.

- **Détection par surintensité de courant – Overcurrent**

Il s'agit de la méthode de détection des défauts la plus utilisée, surtout dans les réseaux en courant alternatif.

Le principe est simple : en détectant une surintensité de courant instantanée, c'est-à-dire un courant dans une ligne supérieure à un seuil donné, l'opération de protection est déclenchée. La seule difficulté est de fixer correctement la valeur de seuil, qui doit être la plus petite possible afin de détecter tous les défauts, mais suffisamment grande pour ne pas déclencher à la moindre ondulation, qui pourrait se produire lors d'une simple variation de charge ou de production.

- **Détection basée sur la dérivation de mesures - di/dt ou dv/dt**

Cette méthode utilise la mesure des dérivées du courant et/ou de la tension pour détecter les défauts. Si une variation de courant ou de tension au travers d'un dispositif dépassant la valeur seuil est mesurée, le déclenchement de la protection connectée à ce dispositif est appliqué.

- **Détection par prédiction de tension - Voltage Estimation**

La prédiction de la tension en condition normale est basée sur la valeur moyenne des données de tension mesurées et échantillonnées précédemment. Cette méthode est à la fois très efficace mais aussi très sensible. En effet, étant donné que des variations surviennent toutes les secondes dans un micro-réseau, l'échantillonnage doit être très précis. De plus, si le défaut est fort éloigné ou que les résistances de défaut sont importantes, une tension normale peut être mesurée alors qu'il y a bien un défaut

I.13/- Conclusion

Dans ce chapitre, on a brièvement présenté le micro-réseau, le mode de leur fonctionnement, ses types AC, DC et hybride, ainsi nous avons montré la différence entre le micros-réseau alimentant en CC et le micro-réseau alimentant en AC. En fin nous avons parlé sur ses multiples objectifs, et on a expliqué les protections de microgrid et la comparaison entre les réseaux traditionnels et intelligents.

CHAPITRE II : méthode de control d'un micro réseaux

II.1/- Introduction

Dans le contexte de l'évolution vers une énergie plus propre et décentralisée, les microgrids se distinguent comme des solutions prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques locaux de manière efficace et résiliente. Ces systèmes autonomes, souvent alimentés par des sources d'énergie renouvelable, nécessitent des méthodes de contrôle sophistiquées pour garantir leur stabilité et leur efficacité opérationnelle.

Ce chapitre se penche sur les différentes méthodes de contrôle utilisées dans les microgrids, en mettant en lumière les approches et les stratégies qui permettent de maintenir la stabilité du système, d'optimiser la gestion de l'énergie et de favoriser l'intégration harmonieuse des sources d'énergie renouvelable. En examinant ces méthodes de manière détaillée, nous visons à fournir un aperçu complet des pratiques de contrôle actuelles dans les microgrids, ainsi qu'à explorer les tendances émergentes et les défis associés à cette technologie en pleine expansion.

II.2/- Contrôle des micro réseaux

Le contrôle est l'une des principales technologies habilitantes pour le déploiement des systèmes de micro réseau. Comme les réseaux électriques classiques, les micro-réseaux ont une structure de contrôle hiérarchique à plusieurs niveaux.

La coordination de différents types de micro-réseau pour établir un système stable contrôlant la fréquence et la tension est une tâche difficile.

Les objectifs de contrôle sont les suivants

- ✓ (a) le contrôle indépendant de la puissance active et réactive
- ✓ (b) la correction de la chute de tension et les déséquilibres du système
- ✓ (c) la satisfaction des exigences de La dynamique de charge du réseau. [6]

II.2.1/- Couche de répartition du réseau de distribution

La couche de répartition du réseau de distribution coordonne et répartit le micro-réseau pour maintenir le réseau de distribution dans un état de fonctionnement sûr et économique. Le micro-réseau agit comme une entité unique contrôlable et flexible par rapport au réseau.

1. Il peut fonctionner soit en parallèle avec le réseau électrique, soit en mode îlot en cas de défaillance du réseau ou si nécessaire
2. Dans des situations particulières (par exemple, un tremblement de terre, une tempête de neige ou une inondation), le micro réseau peut servir le réseau de distribution, fournissant ainsi un soutien efficace au réseau principal et accélérant la récupération du macro réseau après une défaillance

3. En cas de pénurie d'énergie dans le réseau, le micro réseau peut déplacer la charge grâce à son propre stockage d'énergie, évitant ainsi un déclenchement généralisé du réseau de distribution et réduisant la capacité de réserve du réseau.
4. Dans des circonstances normales, la couche participe à la répartition du réseau pour une meilleure économie. [6]

II.2.2/- Architecture de contrôle d'un micro réseau

La structure de contrôle typique d'un micro-réseau est décrite dans la figure (II.1) [12]

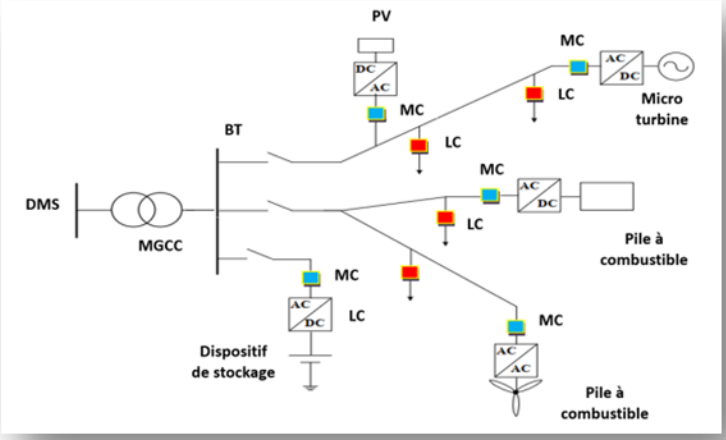


Figure II.1 : L'architecture de contrôle du micro-réseau

Le contrôle d'un micro-réseau comprend :

- Des contrôleurs de source micro (MC) et des contrôleurs de charge (LC).
- Contrôleur central du micro-réseau (MGCC)
- Système de gestion de la distribution (DMS).

Les fonctionnalités de contrôle dans un micro-réseau sont présentées comme suit :

II.2.2.1/- Contrôleurs locaux

- **Contrôleur de micro source (MC) et contrôleur de charge local (LC)**

Le contrôleur du micro source (MC) tire parti de l'interface d'électronique de puissance et peut être amélioré avec des degrés d'intelligence divers. Il utilise l'information locale pour contrôler la tension et la fréquence du 'MG' dans des conditions transitoires. Les 'MC' doivent être adaptés pour chaque type de micro sources (PV, pile à combustible, micro turbine, etc.) [12] et il garantit le :

- Contrôle de la tension/fréquence primaire.
- Contrôle de la puissance active/réactive primaire.

- Gestion de la batterie

Les contrôleurs de charge locaux (LC) installés au niveau des charges contrôlables fournissent des capacités de contrôle de la charge.

II.2.2.2/- Contrôleurs globaux

La commande globale est le niveau de commande le plus élevé pour coordonner le fonctionnement de plusieurs 'MG' interconnectées et communiquer les exigences avec le réseau principal. Il assure le fonctionnement du micro-réseau à un optimum économique et organise les relations entre le 'MG' et le réseau de distribution ainsi que les autres 'MG' connectées. Les contrôleurs globaux et, dans une certaine mesure fonctionnent comme des contrôleurs centralisés, il traite certaines responsabilités générales pour un 'MG', telles que l'échange de puissance avec le réseau principal et/ou d'autres 'MG' connectés

En général, les objectifs les plus importants du contrôle global sont : l'optimisation de la production, l'amélioration des services de contrôle et de répartition du système global, la compensation des déséquilibres énergétiques et le fonctionnement de la réserve tournante.

- **Système de gestion de la distribution (DMS)**

Un système de gestion de la distribution (DMS) est essentiel pour optimiser les opérations des microgrids, des réseaux électriques autonomes fonctionnant à petite échelle. Ce système permet la surveillance en temps réel, le contrôle des équipements tels que les onduleurs et les batteries, et l'optimisation de la production et de la consommation d'énergie. Le DMS facilite également la gestion des ressources distribuées, comme les énergies renouvelables et les systèmes de stockage d'énergie, en les intégrant de manière efficace dans le réseau.

- **Contrôleur central du micro réseau (MGCC)**

L'interface entre le micro-réseau et le réseau principal est assurée par le contrôleur central, qui supervise également l'ensemble des unités du micro-réseau pour diverses tâches, telles que la déconnexion, la reconnexion, le contrôle du flux d'énergie, le contrôle du niveau de défaut, le fonctionnement du marché et le délestage.

Il possède de nombreuses fonctionnalités qui permettent d'organiser les ressources énergétiques distribuées de manière appropriée en fonction de leur capacité de production pour desservir les charges critiques et non critiques.

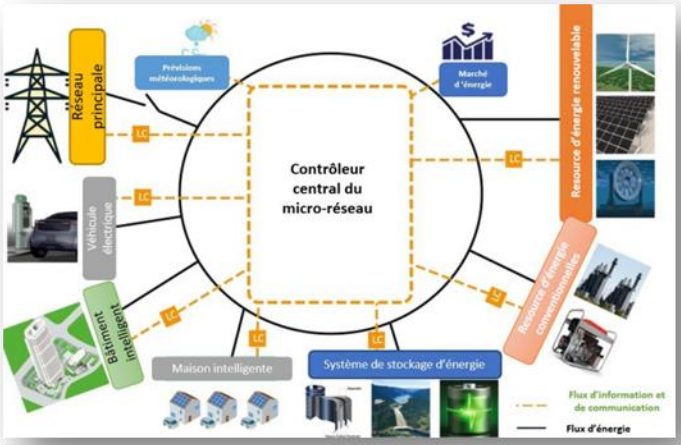


Figure II.2 : Architecture de base d'un contrôleur central de MG. [13]

II.3/- Méthodes de contrôle des micro réseaux

Un contrôle efficace des micro-réseaux est essentiel pour garantir leur stabilité, leur fiabilité et leur efficacité opérationnelle. Il existe deux méthodes de contrôle, le contrôle classique et le contrôle avancé utilisant l'intelligence artificielle (IA), qui sont les principales méthodes de supervision et d'amélioration des opérations des micro-réseaux.

Les méthodes de contrôle conventionnelle, héritées des principes traditionnels de l'ingénierie électrique, constituent une base solide pour la gestion des micro-réseaux. Ils incluent des techniques telles que le contrôle de la tension et de la fréquence, la gestion de la charge et la régulation de la puissance active et réactive. Ces méthodes traditionnelles garantissent la stabilité du réseau et une gestion efficace de l'énergie, mais peuvent parfois être limitées dans leur capacité à s'adapter aux changements dynamiques de la demande et de la production.

D'un autre côté, les méthodes avancées offrent des possibilités révolutionnaires pour contrôler les micro-réseaux. Grâce à des techniques telles que l'apprentissage automatique, les réseaux neuronaux et les algorithmes évolutifs, l'IA peut analyser d'énormes quantités de données en temps réel, détecter des modèles complexes et prendre des décisions indépendantes en fonction de ceux-ci, modifiant ainsi les conditions du réseau.

Cette capacité d'apprentissage et d'adaptation en temps réel rend l'IA particulièrement adaptée à la gestion dynamique et à l'optimisation des micro réseaux.

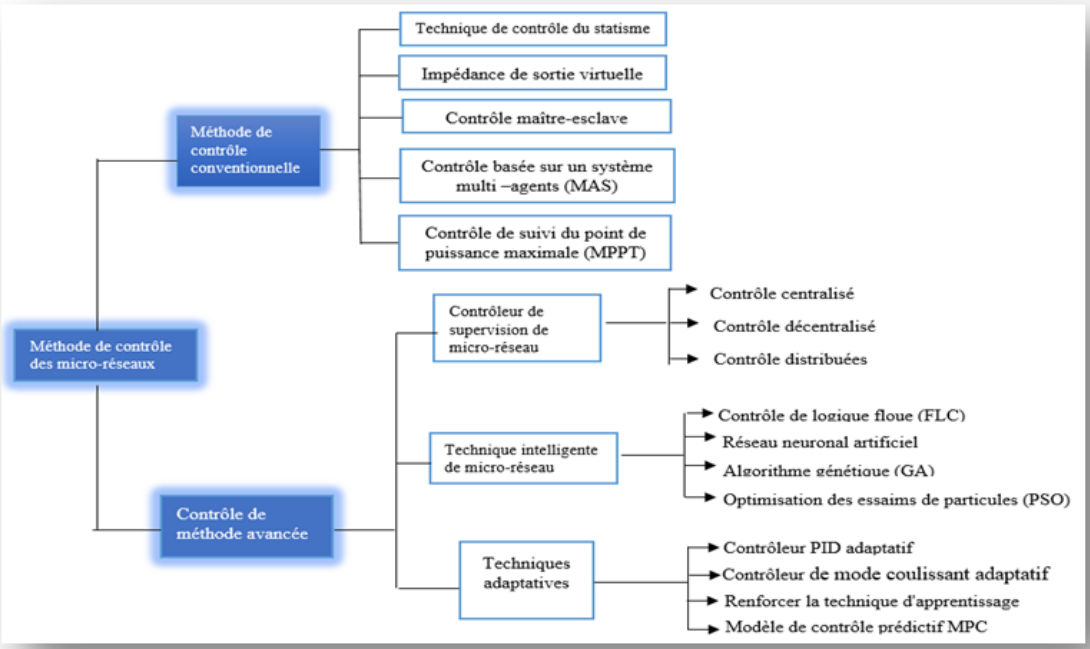


Figure II.3 : Classification des méthodes de contrôle MG en fonction de leurs formations techniques.

II.4/- méthodes de contrôle conventionnelle dans les micro-réseaux

Les méthodes de contrôle conventionnelles ont été largement utilisées dans les MG pour maintenir la stabilité et la régulation de la tension et de la fréquence, en particulier en cas de panne de réseau. Pour relever ces défis de manière appropriée, un système de contrôle hiérarchique a été conçu et largement considéré comme une méthode standard pour une gestion efficace des MG

Le contrôle hiérarchique comprend les niveaux de contrôle tertiaire, secondaire et primaire comme le montre la (figure II.4)

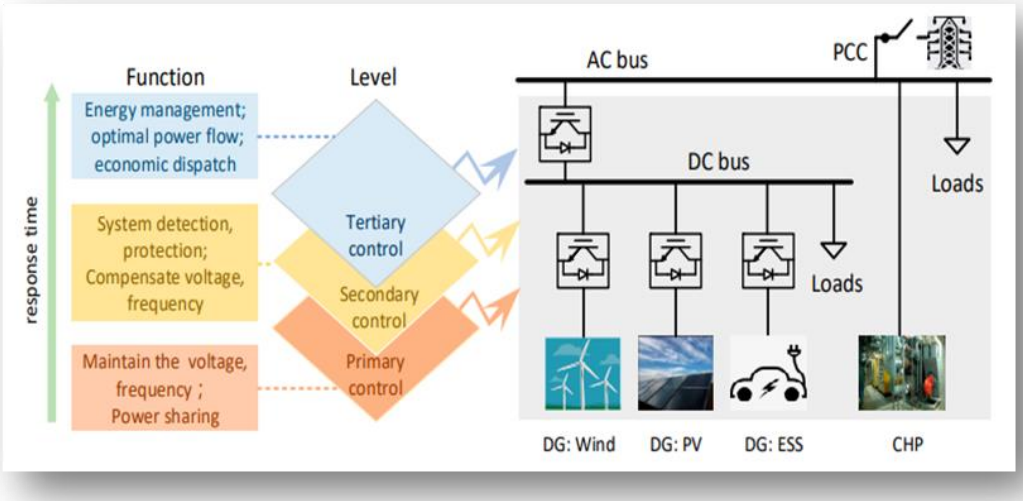


Figure II.4 : Contrôle hiérarchique du micro-réseau. [14]

- **Contrôle primaire**

- Les niveaux de contrôle primaires sont considérés comme les plus difficiles en raison de la nécessité d'assurer la stabilité de la fréquence et de la tension des générateurs distribués en temps réel en cas de perturbation

- Le niveau de contrôle primaire est le plus bas niveau de la hiérarchie et fonctionne au niveau local des composants individuels du microgrid, tels que les générateurs, les onduleurs, les dispositifs de stockage d'énergie et les charges.

- Le contrôle primaire est responsable de la gestion en temps réel des flux d'énergie locaux, du maintien de la stabilité de la tension et de la fréquence, de la gestion des échanges d'énergie avec le réseau principal et des réponses rapides aux perturbations locales.

- **Contrôle Secondaire**

- Le niveau de contrôle secondaire est responsable de la coordination et de l'optimisation des opérations des différentes unités distribuées du microgrid. Il s'agit souvent d'un niveau distribué où les unités du microgrid échangent des informations et collaborent pour atteindre des objectifs communs tels que l'optimisation de la production, la gestion de la charge et la régulation de la tension.

- Les contrôleurs secondaires peuvent mettre en œuvre des algorithmes de coordination distribués, des mécanismes de communication et des techniques d'optimisation pour améliorer la performance globale du microgrid.

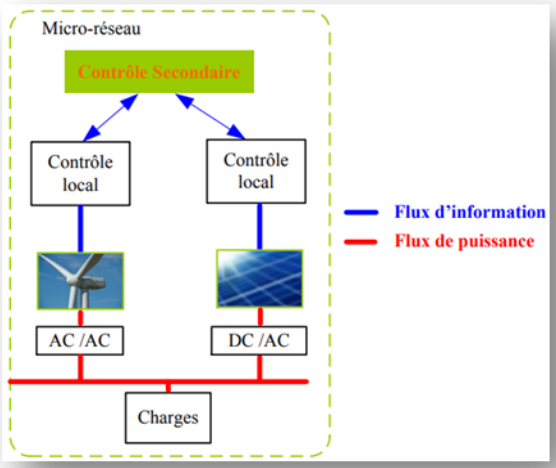


Figure II.5 : Principe du contrôle secondaire. [15]

- **Contrôle Tertiaire**

- Le niveau de contrôle tertiaire est responsable de la gestion globale du microgrid, y compris la planification à long terme, la stratégie de fonctionnement, la gestion des ressources et la coordination avec le réseau principal. Il s'agit souvent d'un niveau centralisé ou supervisé où des systèmes de contrôle avancés, des algorithmes d'optimisation et des outils d'analyse sont utilisés pour prendre des décisions stratégiques et à long terme pour le microgrid.

- Les contrôleurs tertiaires peuvent intégrer des informations provenant de multiples sources, y compris les niveaux primaire et secondaire, ainsi que des données météorologiques, des prévisions de charge et des données de marché, pour optimiser les performances du microgrid

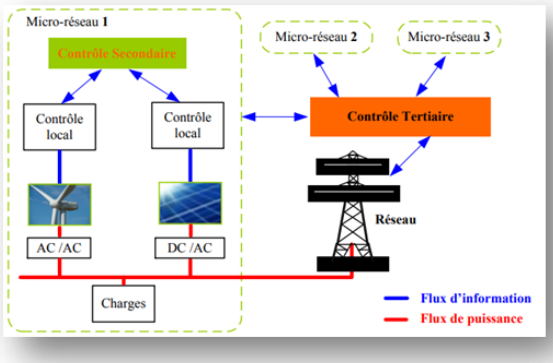


Figure II.6 : Principe du contrôle tertiaire. [15]

Nous allons maintenant discuter des méthodes de contrôle conventionnelle pour obtenir la tension et la fréquence à des niveaux acceptables dans les applications MG.

Les méthodes de contrôle conventionnelle dans les micro-réseaux sont résumées dans le tableau II.1

II.4.1/- Méthode de contrôle du statisme (droop control)

La méthode conventionnelle de contrôle du statisme vise à ajuster la puissance active et réactive (qualité de l'énergie, PQ) sur la base des écarts de fréquence et de tension afin d'éviter d'utiliser des liaisons de communication entre des convertisseurs connectés en parallèle. En mode connecté au réseau, l'objectif principal est d'assurer l'efficacité de l'EMS dans l'organisation de la production ou de l'acheminement de l'énergie et la planification de chaque unité de DG. En mode ilote, l'objectif est de contrôler ou de maintenir la tension et la fréquence du système dans une limite ou un niveau spécifique souhaité. De nombreux schémas de contrôle du statisme ont été proposés pour le partage de charge linéaire dans les MG. [16]

Un schéma fonctionnel de la stratégie de contrôle du statisme est présenté sur la figure.

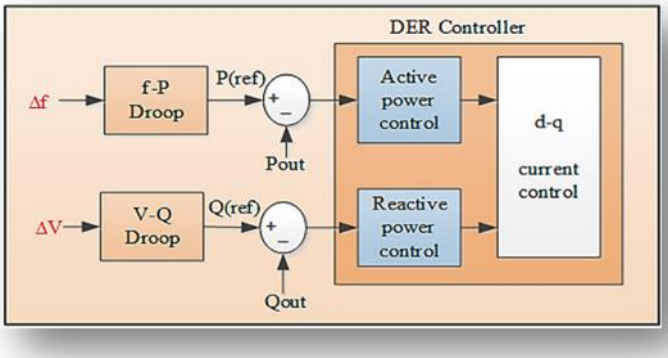


Figure II.7 : Stratégie de contrôle du statisme. [17]

II.4.2/- Impédance de sortie virtuelle

On a introduit la méthode de l'impédance de sortie virtuelle afin d'améliorer la précision du partage d'énergie dans les micro-réseaux. L'objectif de ce schéma de contrôle est d'optimiser la réponse des onduleurs connectés en parallèle en régime permanent et transitoire, tout en garantissant une bonne capacité de partage de puissance active et réactive. On utilise cette méthode en diminuant de manière proportionnelle les références de tension de sortie par rapport au courant de sortie et en réglant la phase et l'amplitude de l'impédance de sortie.

II.4.3/- Technique de contrôle maître-esclave

Il est possible de mettre en place cette stratégie en mode connecté au réseau ou en mode îlotage. Une fois connecté au réseau de distribution, le micro-réseau fonctionne en mode PQ et les productions distribuées utilisant des onduleurs partagent la puissance active et réactive en fonction des références de tension et de fréquence fournies par le réseau. Il est essentiel que la tension aux bornes des onduleurs soit en accord avec l'ampleur et la tension du réseau dans cette

situation. En mode connecté au réseau, le réseau joue le rôle de maître et le convertisseur maître du micro-réseau joue le rôle d'esclave, tandis que l'unité de commande centrale produit des signaux de contrôle de référence. En mode îlot, la principale source de production distribuée joue le rôle de source de contrôle de tension, tandis que toutes les unités de production distribuée esclaves sont alimentées par des sources de courant contrôlées. Il est donc une liaison de communication fiable et rapide est importante pour qu'une unité contrôlée centralisée envoie efficacement des signaux de commande à toutes les unités de production distribuées.

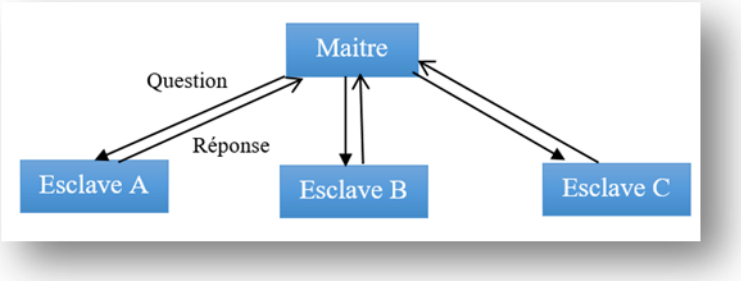


Figure II.8 : contrôle maître-esclave

II.4.4/- Contrôle basée sur un système multi-agents

Le contrôle basé sur le système multi-agents (MAS) pour micro-réseau peut permettre la coordination et le contrôle du micro-réseau de manière décentralisée. Le MAS est un ensemble d'entités informatiques autonomes (agents) qui possèdent la capacité de percevoir des aspects de leur environnement et, dans de nombreux cas, d'agir sur cet environnement, dans certaines limites. Le mécanisme opérationnel du MAS, totalement différent du mode de contrôle analysé classique, repose sur la négociation entre agents. L'application des MAS dans les systèmes de contrôle des micro-réseaux devient populaire en raison de leurs avantages inhérents tels qu'une autonomie, une réactivité, une proactivité et une capacité sociale accrues. L'autonomie du MAS distribué améliore les caractéristiques de contrôle du micro-réseau avec une fiabilité et une flexibilité élevées. [18]

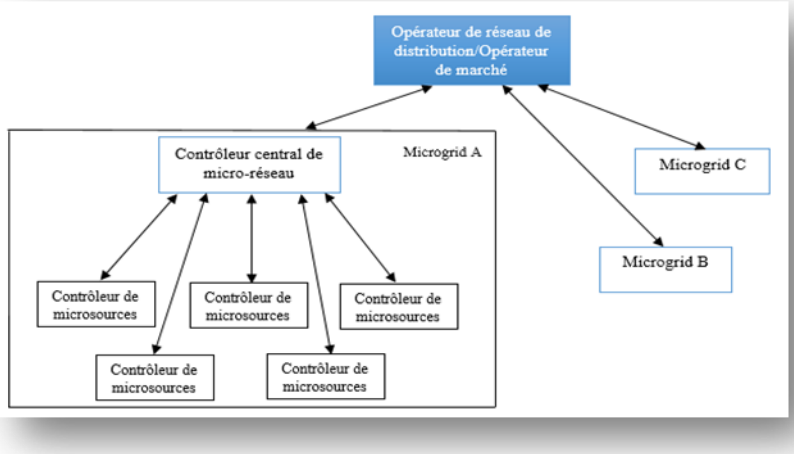


Figure II.9 : Cadre de l'architecture MAS.

II.4.5/- Contrôle de suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Généralement, la production d'énergie, telle que celle des cellules photovoltaïques et des éoliennes, est constamment fluctuante ou stochastique et repose entièrement sur des facteurs environnementaux tels que l'exposition au soleil et la température ambiante.

En se basant sur la nature, le MPPT agit pour récolter un maximum d'énergie de la production des panneaux photovoltaïques installés et agit comme un contrôleur situé au niveau des convertisseurs locaux, exploité par des convertisseurs DC-DC intégrés. La méthode MPPT prend la valeur maximale de l'énergie générée par les cellules photovoltaïques et l'extrait. La méthode MPPT est basée sur le déplacement de la tension ou du courant PV opérationnel pour obtenir une puissance maximale. Cette méthode est également appliquée à d'autres sources d'énergie renouvelables, comme les appareils thermoélectriques.

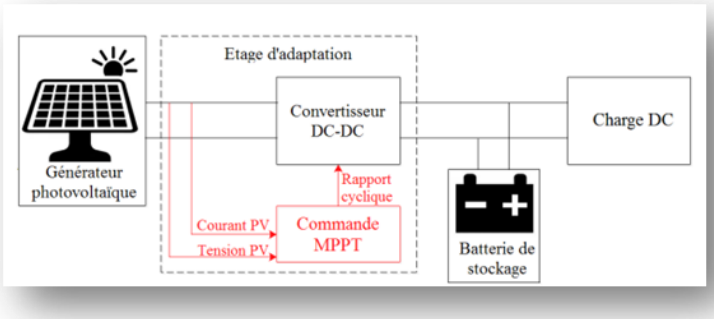


Figure II.10 : Schéma général d'un PV avec un système MPPT. [19]

Méthode de contrôle	Paramètres	Technique	Avantages
Contrôle du statisme	-Tension -Fréquence -Puissance active et réactive	Partage équilibré du courant de charge en ajustant la tension de sortie et la fréquence sous tension par rapport à la caractéristique de statisme de courant	-Permet un partage actif du pouvoir des DER, ce qui améliore la stabilité et la flexibilité du système en éliminant le besoin d'une liaison de communication dans le contrôle décentralisé
Impédance de sortie virtuelle	-Référence de tension -Impédance de tension -Puissance active et réactive	Somme de l'impédance de sortie virtuelle pour équilibrer le partage de puissance réactive et Q	-Offre une réponse temporaire adéquate pour le partage de puissance active et réactive sans variations de fréquence. -Excellent partage de courant avec un courant de circulation harmonique minimisé dans les convertisseurs connectés en parallèle du système DG
Contrôle maître-esclave	-Tension -Fréquence -Micro-sources (MS)	MS se comporte comme un contrôleur maître sous contrôle en mode tension et fournit des références de tension et de fréquence aux autres MS de chaque unité de production distribuée	-Ajuste la violation de la tension et de la fréquence des unités DG -Peut fonctionner dans contrôle centralisé et décentralisé
Contrôle basé sur un système multi-agents (MAS)	-Tension -Courant -Fréquence et puissance	Le MS ou la charge peut fonctionner comme un agent distinct, communiquant avec d'autres personnes dans le système pour coordonner les efforts et partager les connaissances	-Traite de la coordination de l'énergie économique et de la coordination de la tension dans le système de gestion de l'énergie -Caractéristiques de contrôle améliorées du micro-réseau avec une fiabilité, une sécurité et une flexibilité élevées -Résout les problèmes de contrôle de coordination des micro-réseaux
Contrôle du suivi du point de puissance maximale (MPPT)	-Convertisseur DC/DC -Rayonnement solaire -Température, puissance de charge -Tension et courant	Le convertisseur DC/DC inséré entre le panneau PV et les batteries peut contrôler la recherche de MPP et les fonctions typiques	-Déterminer la puissance maximale des RES de sortie en fonction des profils d'irradiation, de température et de charge -Agir comme un convertisseur pour affiner le rapport cyclique et l'impédance d'entrée des signaux de commande -Accroître l'efficacité des installations d'énergies renouvelables

Tableau II.1 : Résumé des méthodes conventionnelles de contrôle dans le microgrid.

II.5/- méthodes de contrôle avancée

L'amélioration des performances de contrôle est un objectif commun des systèmes de contrôle MG. Des techniques de contrôle avancées ont été largement appliquées dans ces systèmes. Ces approches incluent, par exemple, des méthodes intelligentes et adaptatives pour optimiser les paramètres impliqués dans les systèmes de contrôle afin de créer des contrôleurs flexibles et robustes.

II.5.1/- Contrôleur de supervision MG

Les contrôleurs de supervision dans la gestion de l'énergie MG peuvent être classés en trois sous-domaines : centralisés, décentralisés et distribués. L'objectif est de fournir les fonctions nécessaires, telles que le contrôle de la qualité de l'énergie, et d'optimiser le fonctionnement du système en améliorant le niveau d'intelligence.

II.5.1.1/- Contrôle centralisées

Dans le dispositif de contrôle centralisé des 'MG' (Figure II.11), le contrôleur central principal se charge de traiter toutes les instructions et d'effectuer les tâches au sein du Réseau. Plusieurs contrôleurs locaux sont également en service dans cette approche, mais en raison de leur nature centralisée, tous les contrôleurs locaux envoient des instructions au contrôleur central principal, et donc la prise de décision et la supervision de l'ensemble du système sont uniquement effectuées par le contrôleur central. [6]

Ce système a l'avantage d'accomplir une optimisation complète calculée sur toutes les informations actuelles dans le système de gestion de l'énergie multi-objectif, contribue à équilibrer la puissance active et réactive dans un régime permanent.

Il est nécessaire de mettre en place un moyen de communication entre le contrôleur central et tous les contrôleurs locaux à l'intérieur des sources d'énergie distribuées. Parce que lorsque le contrôleur principal n'est plus en ligne, il est impossible pour les contrôleurs locaux de se connecter entre eux, ce qui met en péril l'ensemble du système.

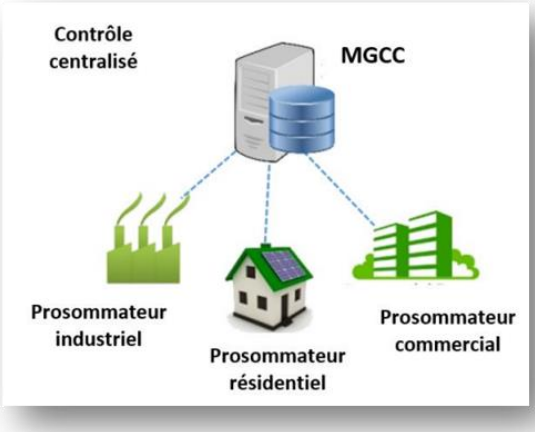


Figure II.11 : Système de contrôle centralisé d'un 'MG'. [6]

II.5.1.2/- Contrôle décentralisées

À l'opposé de la stratégie de contrôle centralisé, dans un système de contrôle décentralisé, les contrôleurs locaux peuvent prendre des décisions de manière indépendante. Chaque contrôleur local définit ses paramètres optimaux et envoie la configuration au contrôleur principal qui évalue la planification optimale des ressources avant de la renvoyer vers les contrôleurs locaux. Ce processus de négociation des paramètres de fonctionnement se poursuit jusqu'à ce que les objectifs locaux et globaux soient atteints.

Ainsi, même en cas de défaillance du contrôleur principal, la performance de l'ensemble du système est peu impactée en comparaison avec l'approche centralisée. La fiabilité du système s'en trouve accrue. Autre avantage apporté par cette stratégie : la fiabilité accrue du système. Le seul inconvénient étant l'évolutivité limitée du système du fait de l'absence de communication directe entre les contrôleurs locaux.

II.5.1.3/- Contrôle distribuées

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.

Chaque composant du microgrid, tel qu'un onduleur ou une unité de stockage, dispose de son propre contrôleur qui prend des décisions de manière autonome en fonction de ses objectifs locaux et des conditions du système.

Cela signifie que chaque appareil est contrôlé en fonction des mesures locales tout en tenant compte de la réponse des voisins

Un système distribué possède les caractéristiques suivantes :

- ✓ **Partage des ressources :** Un système distribué peut partager du matériel, des logiciels ou des données
- ✓ **Traitement simultané** : Plusieurs machines peuvent traiter la même fonction simultanément
- ✓ **Évolutivité** : La capacité de calcul et de traitement peut être augmentée en fonction des besoins lorsqu'elle est étendue à des machines supplémentaires
- ✓ **Détection des erreurs** – Les défaillances peuvent être détectées plus facilement
- ✓ **Transparence** : Un nœud peut accéder à d'autres nœuds du système et communiquer avec eux

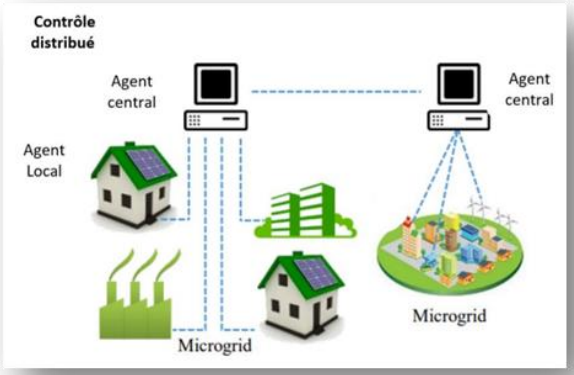


Figure II.12 : Système de contrôle distribué d'un 'MG'. [6]

Nous pouvons donc clarifier le point de différence entre le contrôle centralisé, décentralisé et distribué dans le tableau ci-dessous :

Type de contrôle :	Le principe de fonctionnement
Contrôle Centralisé :	Dans le contrôle centralisé, toutes les décisions de contrôle sont prises par un seul système central qui surveille et coordonne l'ensemble du MG
Contrôle Décentralisé :	Le contrôle décentralisé distribue les fonctions de contrôle entre plusieurs unités autonomes réparties dans le MG Chaque unité prend des décisions localement en fonction des informations qu'elle reçoit.

Contrôle Distribué :	Le contrôle distribué va encore plus loin dans la distribution de l'autonomie. Chaque composant du MG a son propre contrôleur qui prend des décisions de manière autonome en fonction de ses objectifs locaux et des conditions du système.

Tableau II.2 : la différence entre le contrôle centralisé, décentralisé et distribué

II.5.2/- Techniques intelligentes

Une gamme de solutions intelligentes dans les applications de systèmes électriques peut augmenter les performances du système de contrôle et la stabilité de l'alimentation électrique. De plus, à mesure que le nombre d'unités DG dans les MG augmente, la complexité de l'ajustement des paramètres de contrôle du système augmente également. De nombreuses stratégies complexes ont également été utilisées pour contrôler ces paramètres dans les MG, en tenant compte de la répartition des charges économiques dans les systèmes MG. L'intelligence artificielle a été utilisée pour augmenter l'efficacité et les performances des systèmes de MG, leur permettant de répondre à la demande tout en générant le plus d'énergie. [20]

Les technologies intelligentes les plus utilisées pour améliorer les performances du système sont les suivantes :

II.5.2.1/- Contrôle à logique floue (FLC)

Dans les microgrids, le contrôle de logique floue émerge comme une approche novatrice pour gérer les opérations énergétiques dans des environnements complexes et dynamiques. En utilisant des concepts de logique floue, cette méthode permet d'interpréter et de prendre des décisions sur des données imprécises ou variables, ce qui s'avère crucial dans les systèmes distribués où les conditions fluctuent fréquemment. Vise à créer une zone grise entre zéro et un en décomposant les problèmes logiques en morceaux plus petits et plus gérables

En général, trois étapes sont impliquées dans la conception FLC : la fuzzification, le processus d'inférence floue et la défuzzification (Fig.II.13). FLC fonctionne sur une règle de base formulée pour contrôler une sortie similaire à la règle « if-else » qui est précédée d'une condition puis suivie d'une conclusion

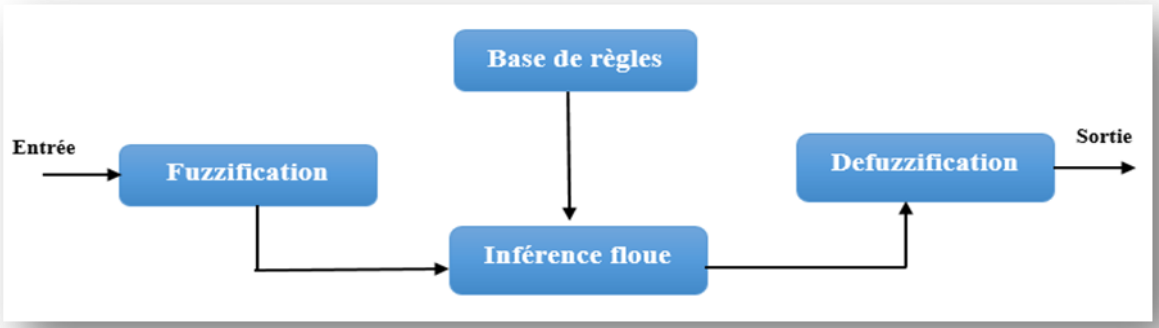


Figure II.13 : Architecture générale du contrôle à logique floue (FLC).

II.5.2.2/- Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont des modèles informatiques qui imitent le fonctionnement du cerveau humain en traitant l'information à travers des couches de neurones interconnectés. Sont utilisés pour diverses tâches liées à la gestion et à l'optimisation du système énergétique.

Les données sont envoyées au processeur central via un contrôleur de réseau neuronal à un rythme différé. Une conception en boucle fermée est utilisée pour transférer des informations les uns aux autres tout en minimisant l'erreur ou la fonction prévue. L'architecture fondamentale contient une couche d'entrée/sortie, une fonction d'activation, des poids et des éléments cachés ultérieurement. Permettant une plus grande flexibilité et une mise en œuvre plus simple pour une variété de situations opérationnelles, les réseaux de neurones constituent un contrôleur plus intelligent et auto-apprenant. La stabilité de MG est en outre renforcée par le comportement résilient des réseaux neuronaux et par leurs capacités de prise de décision rapides pendant leur fonctionnement.

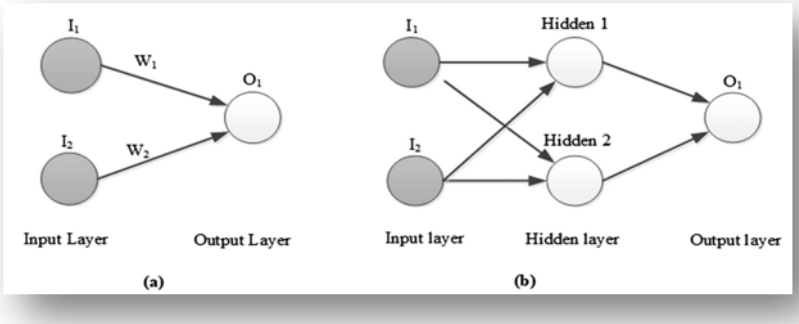


Figure II.14 : Architecture des réseaux de neurones : (a) réseau de neurones monocouche ; (b) réseau neuronal multicouche.

II.5.2.3/- Algorithme génétique (GA)

Les algorithmes génétiques émergent dans les microgrids comme des outils efficaces pour optimiser la gestion énergétique et résoudre les défis complexes liés à l'intégration des sources renouvelables, à la planification de la production et à la gestion des charges, trouver des solutions optimales pour explorer un large domaine de recherche.

L'AG est un algorithme de recherche heuristique adaptatif basé sur des idées évolutives de sélection naturelle et de génétique. Se compose de cinq éléments, à savoir un générateur de population aléatoire initial, une unité d'évaluation de « condition physique » et des opérateurs génétiques pour les opérations de « sélection », de « croisement » et de « mutation ».

L'opérateur de « sélection » sélectionne un ensemble prédéfini de solutions d'ajustement. L'opérateur « crossover » trouve de nouvelles solutions pour produire des valeurs de fitness élevées par rapport à ses prédécesseurs. La « mutation » permet à l'algorithme d'échapper au problème du minimum local. Les étapes sont répétées jusqu'à ce que la convergence souhaitée soit atteinte.

Les structures générales des opérations GA sont représentées sur la figure II.15. [16]

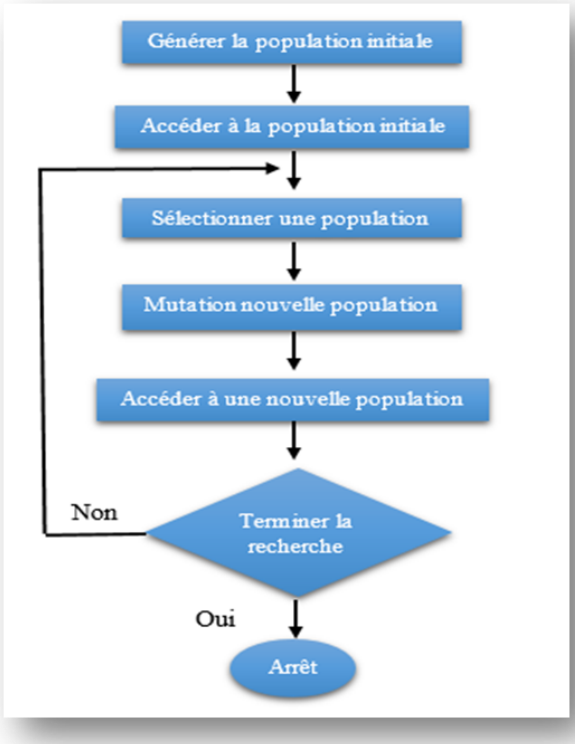


Figure II.15 : Structure générale de l'algorithme génétique.

II.5.2.4/- Optimisation des essaims de particules

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une technique d'optimisation populaire dans le contrôle MG en raison de sa simplicité et de son efficacité. PSO est un algorithme d'optimisation basé sur un essaim. Cela commence par initialiser une population de solutions candidates, appelées particules, puis met à jour leurs positions et vitesses de manière itérative en fonction de la meilleure solution trouvée jusqu'à présent par l'essaim et de la meilleure solution personnelle de chaque particule. L'algorithme est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait, généralement un nombre maximum d'itérations ou un seuil de convergence. PSO a été appliqué à divers problèmes de contrôle dans MG, tels que la répartition optimale, la répartition économique et le contrôle de la fréquence de charge :

- Dans la répartition optimale, le PSO est utilisé pour trouver la puissance de sortie optimale de chaque générateur et unité de stockage afin de minimiser le coût d'exploitation total tout en satisfaisant la demande de charge et les contraintes du système.
- En répartition économique, le PSO est utilisé pour minimiser le coût total du carburant des générateurs tout en répondant à la demande de charge et aux contraintes de transmission.
- Dans le contrôle de fréquence de charge, le PSO est utilisé pour régler les paramètres PID des contrôleurs afin de réguler la fréquence et le flux d'énergie de la ligne de liaison dans des limites acceptables. [4]

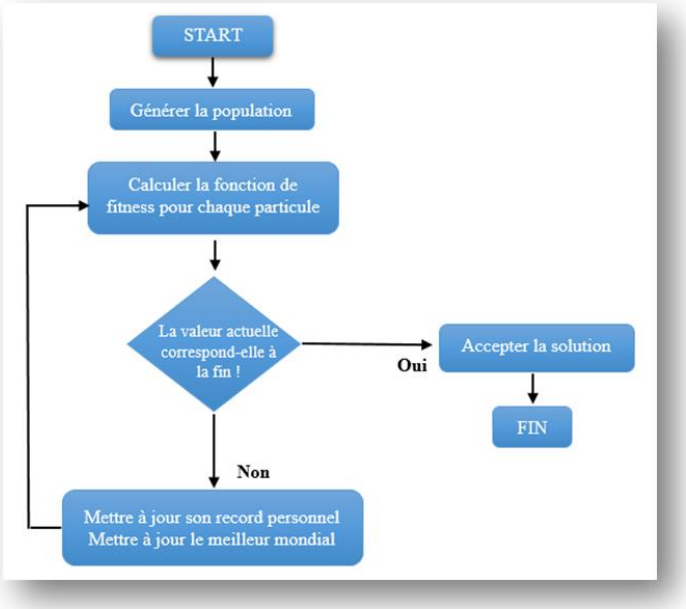


Figure II.16 : Optimisation des essaims de particules.

II.5.3/- Techniques adaptatives

Ces dernières années, les techniques de contrôle adaptatif sont devenues un sujet de recherche captivant. Il est possible d'utiliser ces techniques dans les applications de micro-réseaux afin de garantir la stabilité du système, la convergence de la solidité et l'optimisation. La plupart du temps, ces méthodes sont employées afin de résoudre et de faire face aux variables d'incertitude et aux perturbations dans les applications de micro-réseaux.

Les techniques adaptatives couramment employées dans les applications de micro-réseaux sont présentées dans la section suivante afin de régler les variations de tension et de fréquence et d'obtenir des valeurs optimales pour la production d'électricité.

II.5.3.1/- Contrôleur (PID) adaptatif

Dans la technique proportionnelle-intégrale-dérivée (PID), le contrôleur PID doit réguler automatiquement les événements de perturbation de puissance ou de variation de charge. Dans ce contrôleur, les paramètres sont sélectionnés par essais et erreurs ou par d'autres méthodologies, telles que celles de Ziegler et Nicholas [21]. Une amélioration du contrôle de la fréquence de charge pour les MG à petite échelle, qui ajuste correctement le contrôleur pour réduire l'inadéquation entre la production d'énergie réelle et les demandes de charge et pour obtenir des écarts minimaux de puissance et de fréquence, a également été présentée [21]. Les méthodes proposées par Ziegler et Nicholas et l'erreur quadratique intégrale ajustent le gain du contrôleur PID pour obtenir la polarisation de fréquence de la dynamique du système électrique. En général, la plupart des contrôleurs PID sont utilisés pour réguler la fréquence dans les systèmes MG. La structure générale du processus du contrôleur PID est illustrée à la (figure II.17)

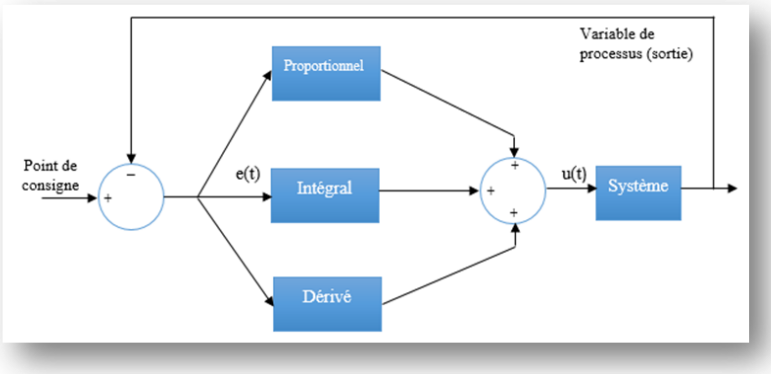


Figure II.17 : Structure générale des contrôleurs PID.

II.5.3.2/- Contrôleur de mode coulissant adaptatif

La production d'électricité et les charges sont soumises à différents contrôles d'incertitude dans les micro-réseaux, notamment dans les micro-réseaux îlots. Quand le micro-réseau se trouve isolé en cas de panne de courant, il devient difficile de maintenir les paramètres d'incertitude et les contraintes des unités de production distribuées et des charges. En raison de sa fiabilité et de son efficacité pour résoudre ces problèmes, le contrôleur adaptatif à mode glissant et devenu une méthode avantageuse pour les systèmes de micro-réseaux.

Le contrôleur à mode glissant est employé en mode connecté au réseau en tant que contrôle PQ dans le bus principal afin de contrôler la puissance active et réactive. Ce dispositif a aussi été employé afin de :

- Maintenir la stabilité de la sortie de tension et de fréquence en cas de perturbations.
- Réduire les variations de puissance et de charge du générateur pour les éoliennes.
- Contrôler le déplacement de la pompe tout en reculant un contrôleur de piston de course pour suivre les erreurs d'angle de pas [22].

II.5.3.3/- Apprentissage renforcé

On a largement utilisé la méthode d'apprentissage renforcé dans les systèmes de contrôle de micro-réseaux afin de gérer les incertitudes des contraintes de paramètres en mode îlot. Prenons l'exemple de l'utilisation de l'apprentissage renforcé pour gérer les variations de charge dans les systèmes de micro-réseaux. En outre, une amélioration de l'apprentissage peut faciliter la prise de décisions politiques optimales, améliorer les processus de gestion, stabiliser la production de DG et réguler la tension et la fréquence, notamment dans les micro-réseaux isolés. Plusieurs opérations ont également été soumises à l'apprentissage renforcé, comme la gestion de l'énergie et les problèmes économiques. L'amélioration de l'apprentissage permet de prendre les décisions politiques les plus optimales et de fournir la fonction objectif la plus efficace pour améliorer les performances du système.

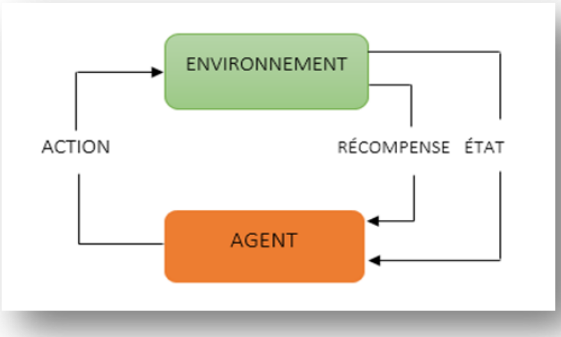


Figure II.18 : Schéma d'apprentissage par renforcement.

II.5.3.4/- Modèle de contrôle prédictif

Une commande prédictive (MPC) est utilisée pour développer et valider un système de gestion de l'énergie (EMS) optimal afin de reprogrammer économiquement un réseau de micro-réseaux interconnectés avec un système de stockage d'énergie (ESS) hybride en cas de défaillance. L'objectif de l'algorithme est de réduire les pertes économiques en cas de défaillance en créant un marché local de l'énergie dans le réseau de micro-réseaux plutôt que de participer aux marchés intra journaliers ou en temps réel.

Il est fréquent d'utiliser une méthode de contrôle prédictif de modèle (MPC) pour contrôler les convertisseurs électroniques de puissance afin de contrôler la tension de sortie de l'onduleur et garantir la stabilité du partage de puissance entre les onduleurs DG lors des opérations MG en mode îlot. On améliore les méthodes de commande prédictive afin de prédire les signaux de référence.

Généralement, un MPC est constitué de trois niveaux, à savoir l'extrapolation, le modèle prédictif et la réduction des coûts. En optimisant les fonctions de coût définies par l'utilisateur.

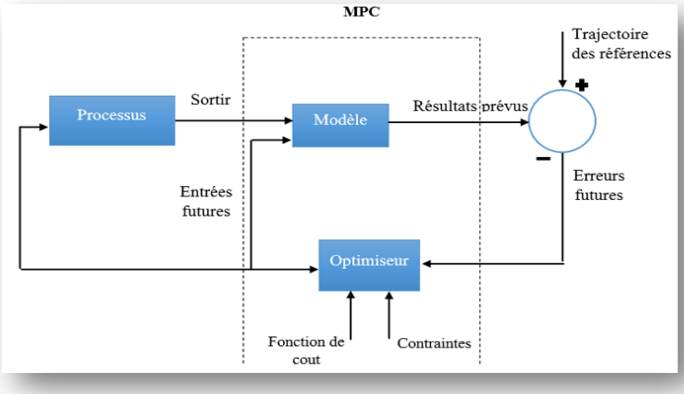


Figure II.19 : Architecture générale du système prédictif.

II.6/- Conclusion

Nous avons commencé dans ce chapitre par une vue d'ensemble des principaux objectifs du contrôle dans les microgrids, notamment la régulation de la tension, de la fréquence et de la puissance, ainsi que la gestion des charges. Ensuite, nous explorerons en détail les différentes méthodes de contrôle utilisées pour atteindre ces objectifs, en mettant l'accent sur les approches classiques telles que le contrôle droop, ainsi que sur les méthodes plus avancées telles que le (contrôle prédictif et l'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle ….)

CHAPITRE III : modélisation et control d'un micro réseaux

III.1/- Introduction

Les microgrids, se positionnent au cœur de la transition énergétique mondiale, offrant une réponse innovante et adaptable aux défis actuels de la distribution et de la consommation d'énergie. En effet, ces systèmes énergétiques locaux permettent une gestion décentralisée et intelligente des ressources, intégrant une variété de sources d'énergie renouvelable, de systèmes de stockage, et de charges électriques pour répondre aux besoins spécifiques des communautés, des entreprises et des infrastructures.

La modélisation et le contrôle des microgrids représentent des piliers essentiels pour comprendre, optimiser et exploiter pleinement le potentiel de ces systèmes dynamiques et complexes. La modélisation permet de représenter mathématiquement les interactions entre les différentes composantes du microgrid, tandis que le contrôle vise à concevoir des stratégies et des algorithmes pour réguler efficacement la production, la distribution et la consommation d'énergie.

III.2/- Contrôle hiérarchique des AC microgrids

Les micro-réseaux AC ont généralement deux modes de fonctionnement : le mode connecté au réseau et le mode îlotage. Par conséquent, les problèmes de stabilité de tension et de fréquence de deux modes de fonctionnement des micro-réseaux à courant alternatif doivent être pris en compte. Il existe des listes de fonctions de contrôle de micro-réseau pour résoudre les problèmes de stabilité de fréquence et de tension comme suit :

- L'amplitude et la fréquence de tension doivent être maintenues pour les modes connecté au réseau et en îlotage
- Tous les RES et DG sont capables de partager l'énergie fournie à la charge dans les micro-réseaux AC
- En cas de panne du réseau électrique public, les micro-réseaux peuvent détecter et se déconnecter du réseau et fonctionner en mode îlotage. Ensuite, le micro-réseau peut être reconnecté au réseau une fois le défaut automatiquement résolu.
- Les micro-réseaux peuvent contrôler le flux d'énergie au niveau des PCC connectés au réseau électrique public (contrôle de fréquence des lignes de raccordement)
- Les micro-réseaux nécessitent un EMS pour l'efficacité énergétique.

Par conséquent, une stratégie de contrôle hiérarchique du micro-réseau AC est nécessaire pour contrôler et stabiliser la tension et la fréquence dans le micro-réseau, peut être classé en trois niveaux : contrôle primaire, contrôle secondaire et contrôle tertiaire

A/- Le contrôle primaire est le contrôle de la tension et la fréquence dans un micro-réseau. L'amplitude et la fréquence de tension sont régulées aussi bien en fonctionnement connecté au réseau qu'en îlotage. La puissance active et la puissance réactive sont contrôlées indépendamment dans chaque convertisseur en utilisant une référence de tension et de fréquence au point de connexion du convertisseur. Le convertisseur d'alimentation du réseau est généralement utilisé dans ce contrôle primaire, comme les convertisseurs photovoltaïques et les convertisseurs éoliens, qui comprennent une boucle de contrôle de tension et une boucle de contrôle de courant.

B/- Le contrôle secondaire est une technique de contrôle pour la compensation de tension et de fréquence. Le convertisseur prenant en charge le réseau est utilisé dans ce niveau de contrôle pour rétablir les perturbations de tension et de fréquence normales dans les micro-réseaux.

C/- Le contrôle tertiaire est appliqué pour l'EMS dans le contrôle du flux d'énergie des micro-réseaux et des lignes de raccordement au PCC qui est connecté au réseau public [23].

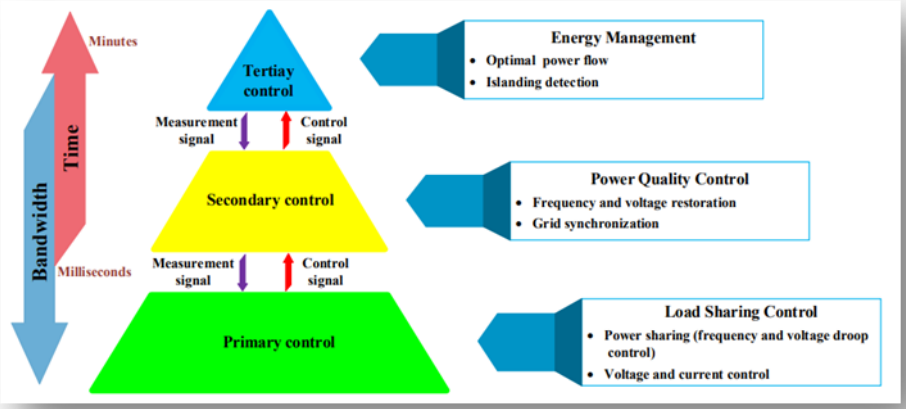


Figure III. 1: Contrôle hiérarchique à plusieurs niveaux pour micro-réseau AC

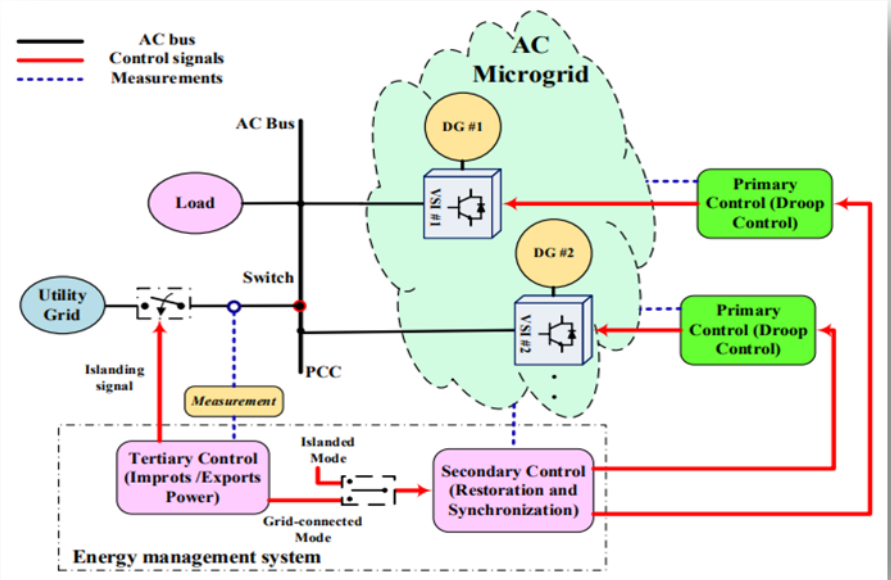


Figure III. 2: Diagramme schématique du contrôle hiérarchique du micro-réseau AC

III.3/-Modélisation et control d'un micro réseau connecte au réseau

III.3.1/- Commande de convertisseur de puissance

Il est nécessaire de comprendre la fonction d'un convertisseur de puissance dans un micro-réseau car il joue un rôle important dans le contrôle.

Un convertisseur de puissance est un dispositif utilisé pour faire l'interface entre les sources RES ou de stockage d'énergie (ESS) et un micro-réseau ; par conséquent, il est essentiel de définir les contrôleurs de convertisseur dans chaque DG. L'objectif principal d'un convertisseur de puissance est de synchroniser une source d'énergie avec un micro-réseau afin que l'énergie puisse être transférée entre un micro-réseau et une source d'énergie.

Il existe deux fonctions principales d'un convertisseur de puissance : le mode d'alimentation du réseau (**grid-feeding mode**)**.** Le mode d'alimentation en réseau agit comme une source pour alimenter en énergie un micro-réseau , tandis que le mode supportant le réseau fonctionne pour réguler la fréquence et la tension d'un micro-réseau [23]

III.3.1.1- Mode d'alimentation du réseau (grid-feeding mode)

Un convertisseur de puissance fonctionnant en mode alimentation réseau transférera l'énergie des sources d'énergie vers un micro-réseau. Les convertisseurs d'alimentation du réseau sont contrôlés comme une source de courant pour alimenter le micro-réseau en énergie à partir de sources d'énergie photovoltaïque ou éolienne. Un convertisseur de source de courant

présente normalement une impédance de sortie parallèle élevée, ce qui permet à un convertisseur alimentant le réseau de fonctionner en parallèle avec d'autres convertisseurs alimentant le réseau. [24]

Un contrôleur de point de puissance maximale (MPPT) est normalement utilisé en mode d'alimentation au réseau en réglant la puissance active de référence (P^*) et la puissance réactive (Q^*) comme indiqué sur (Figure III.3)

Les convertisseurs d'alimentation au réseau surveilleront la fréquence et la tension au point de couplage commun (P_{CC}) pour se synchroniser avec un micro-réseau à courant alternatif et fournir un courant autant que possible.

Par conséquent :

- Les convertisseurs alimentés par le réseau nécessitent une tension et une fréquence de référence provenant d'un micro-réseau pour effectuer un cadre de référence dq.
- Le convertisseur alimentant le réseau ne peut pas fonctionner dans une opération d'îlotage s'il n'y a pas de convertisseur prenant en charge le réseau ou de générateur synchrone local.

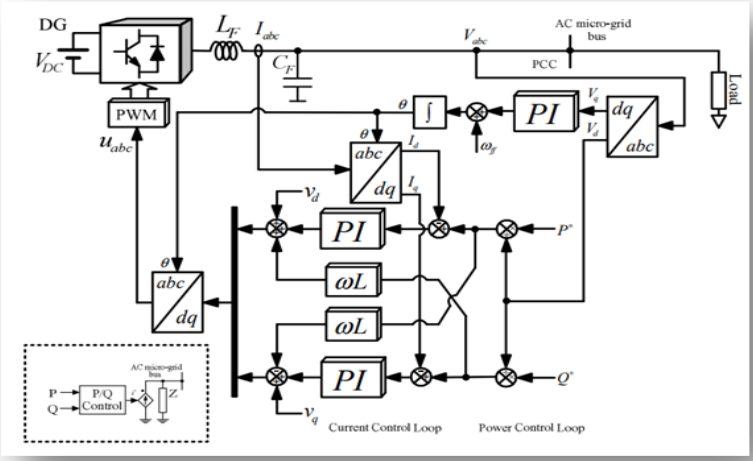


Figure III. 3: Paradigme de contrôle des convertisseurs alimentés par le réseau.

III.3.1.2- Mode de support du réseau (grid-supporting mode)

Les convertisseurs supportant le réseau sont généralement contrôlés comme une source de tension et fonctionnent normalement dans une opération d'îlotage. Les batteries ou autres ESS peuvent être utilisés comme source d'énergie pour le convertisseur supportant le réseau afin de réguler la tension d'amplitude ($E*$) et la fréquence ($\omega*$) du micro-réseau en contrôlant la puissance active et réactive fournie au micro-réseau ; F. La technique de contrôle du statisme

est généralement appliquée dans les convertisseurs supportant le réseau [24], comme illustré sur (la Fig III.4).

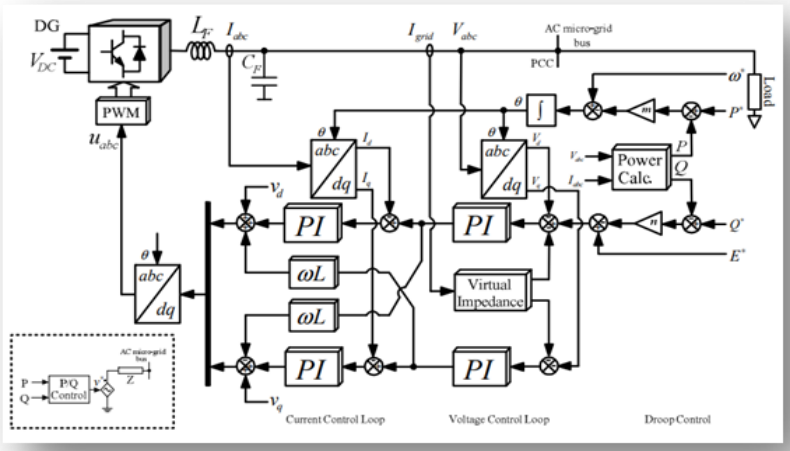


Figure III. 4: Paradigme de contrôle des convertisseurs supportant le réseau.

III.3.2/- Contrôle du niveau primaire dans le mode d'alimentation du réseau

Compte tenu de ce qui précède, un contrôle primaire d'un Grid-Feding connecté à un DG peut être construit. La conception de haut niveau du contrôle est illustrée dans la figure III.5 ci-dessous. Cette figure représente la source d'alimentation du DG, l'onduleur suivi du filtre LC, le reste des unités de production d'électricité du microgrid et le sous-système de contrôle.

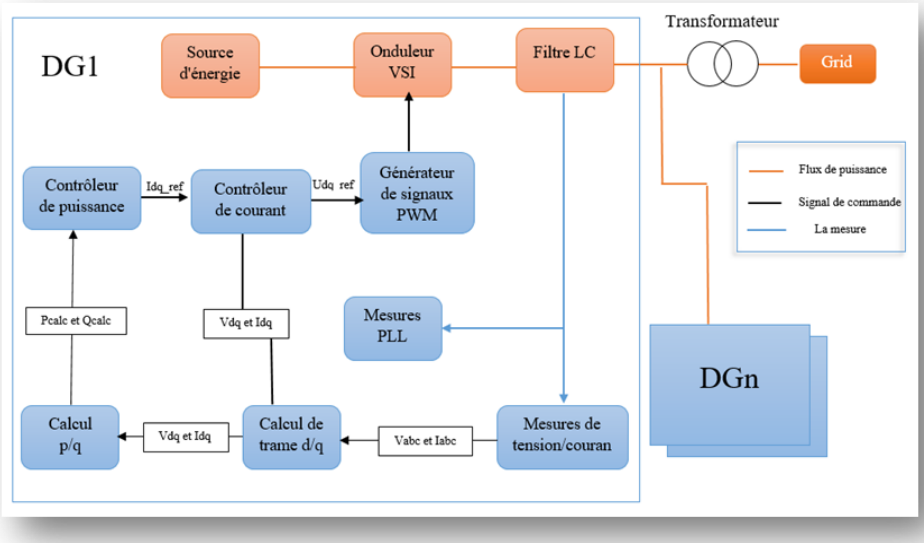


Figure III. 5: Contrôle primaire d'un convertisseur d'alimentation en réseau

Les mesures de Vabc à travers le condensateur du filtre et de Iabc à travers l'inductance, la transformation dq est appliquée et de nouveaux signaux Vdq et Idq sont obtenus. Ainsi, la

puissance active Pcalc et la puissance réactive Qcalc peuvent être obtenues en utilisant respectivement les équations 3.1 et 3.2

$$p = V_d I_d + V_q I_q \quad (3.1)$$

$$Q = V_d I_d - V_q I_d \quad (3.2)$$

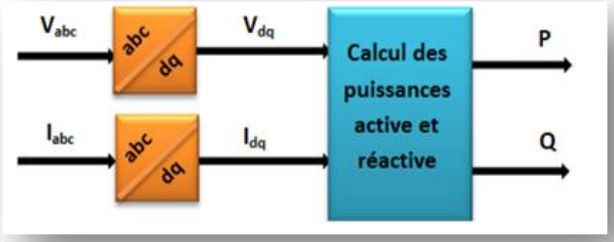


Figure III. 6: La structure de bloc de calcul des puissances active et réactive [25]

L'algorithme de contrôle se compose de deux boucles de contrôle principales : une boucle de contrôle de puissance et une boucle de contrôle de courant.

Le contrôleur de puissance représenté sur la figure III .7 reçoit les signaux de référence du contrôleur secondaire P_{ref} et Q_{ref} et les compare aux P_{calc} et Q_{calc} calculés.

Des contrôleurs PI numériques de forme parallèle avec une discrétisation trapézoïdale et un temps d'échantillonnage Ts sont utilisés pour réguler la puissance et produire des signaux de référence de courant idref et iqref qui sont envoyés à la boucle de contrôle de courant. La fonction de transfert du contrôleur PI P(z) est de la forme de l'équation 3.3

$$P(Z) = K_p + K_I \frac{Ts}{2} \frac{Z+1}{Z-1} \quad (3.3)$$

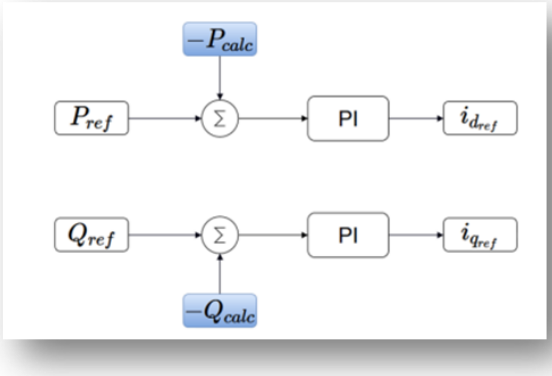


Figure III. 7: Contrôleur de puissance

La boucle de contrôle de courant ; représenté sur (figure III.8), utilise un contrôleur PI numérique ayant la même forme que l'équation 3.3 pour réguler le courant.

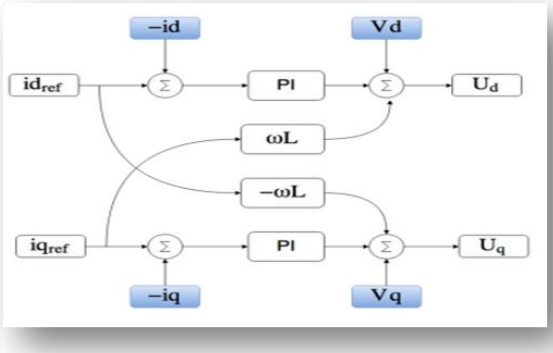


Figure III. 8: Contrôleur de courant

La sortie de la boucle de contrôle est envoyée à un générateur de signal PWM pour générer un signal de déclenchement vers le circuit onduleur. Le générateur PWM utilise la fréquence w obtenue à partir du bloc PLL. Lors de la mise en œuvre des contrôleurs de puissance et de courant, il est important de s'assurer que la dynamique de la boucle de contrôle de courant interne est plus rapide que celle de la boucle de contrôle de puissance externe. La raison en est de garantir que le contrôleur interne est capable de réagir en temps opportun aux signaux de référence de la boucle externe.

III.4/- Modélisation et control d'un micro réseau isolée au réseau

Une fois que le réseau électrique principal est séparé du micro-réseau, chaque DG à l'intérieur du micro-réseau perdra sa stabilité en termes de valeurs très élevées de transitoires de courant ou de tension. En mode insulaire, les convertisseurs de puissance alimentant le réseau ne peuvent pas fonctionner à moins qu'il existe un convertisseur de puissance formant ou supportant le réseau afin que l'amplitude et la fréquence de tension du micro-réseau AC puissent être ajustées.

III.4.1/ Mode de formation du réseau (grid-forming)

Un convertisseur de puissance qui forme un réseau est activé au PCC lorsque le micro-réseau devient îloté. Le schéma de circuit du convertisseur de puissance formant réseau en mode îloté est représenté à la (figure III.9)

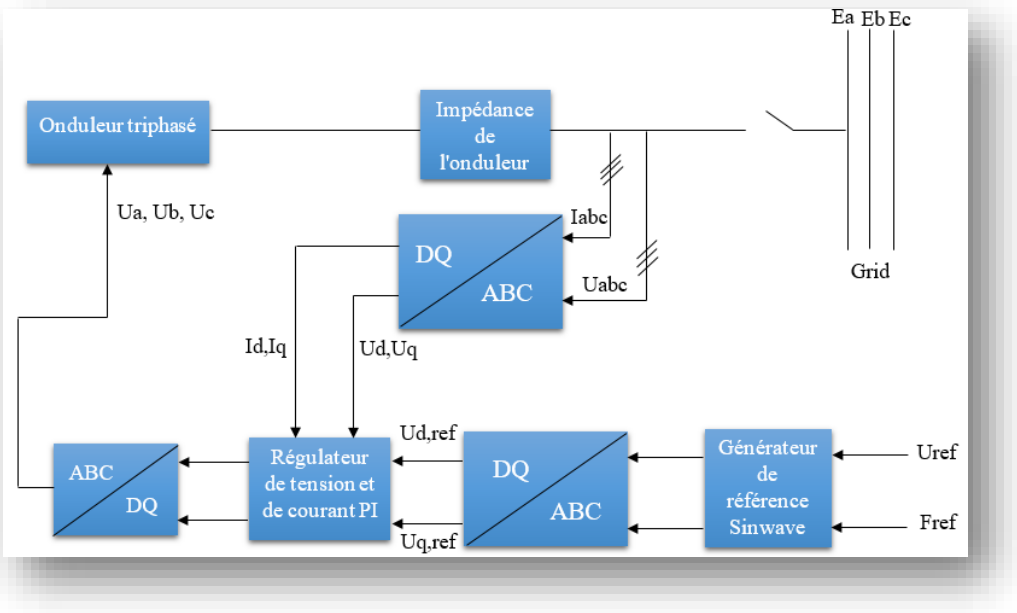


Figure III. 9: Schéma de circuit du convertisseur de puissance formant réseau en mode îloté

Le circuit de contrôle de tension et de courant pour le convertisseur de puissance formant réseau en mode îloté est illustré à la figure III.10

L'unité de contrôle utilise des régulateurs de tension pour extraire les références de courant souhaitées. Après cela, en utilisant les contrôleurs PI appropriés, U_d et U_q suivront avec succès leurs références. Les références de courant de sortie i_{dref} et i_{qref} sont comparées à i_d et i_q, et la différence est insérée dans un autre contrôleur PI. Enfin, la sortie résultante de la boucle de courant fonctionne comme un signal de référence de tension qui est délivré aux signaux de déclenchement du convertisseur de puissance triphasé.

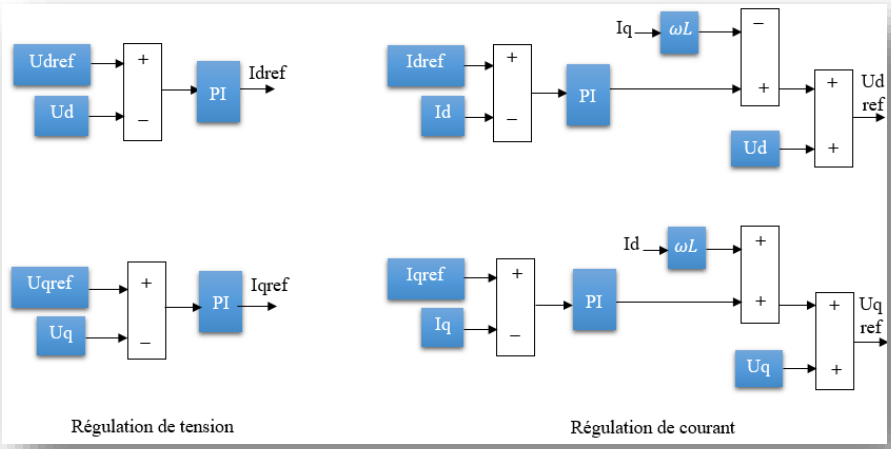


Figure III. 10: Contrôle de tension et de courant du convertisseur de puissance en mode îloté

III.5 /- contrôle du statisme (Droop control)

L'impédance de sortie de l'onduleur dans le contrôle de statisme conventionnel [35-36] est supposée être purement inductive en raison de son impédance de ligne inductive élevée et de son grand filtre inducteur. Le circuit équivalent de deux onduleurs connectés en parallèle à un point de bus de couplage commun est représenté sur la Figure III.11(a), et le diagramme de phaseur est illustré à la Figure III.11(b). Dans un système inductif, la puissance active et réactive consommée vers un bus depuis chaque onduleur peut être exprimée comme suit :

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{EV \sin \alpha}}{\mathbf{X}} \qquad (3.4)$$

$$\mathbf{Q} = \frac{\mathbf{EV \cos \alpha - V^2}}{\mathbf{X}} \qquad (3.5)$$

Où :

- E et V : sont respectivement les amplitudes de la tension de sortie de l'onduleur et de la tension du bus commun
- α est l'angle de puissance
- X est la réactance de sortie de l'onduleur.

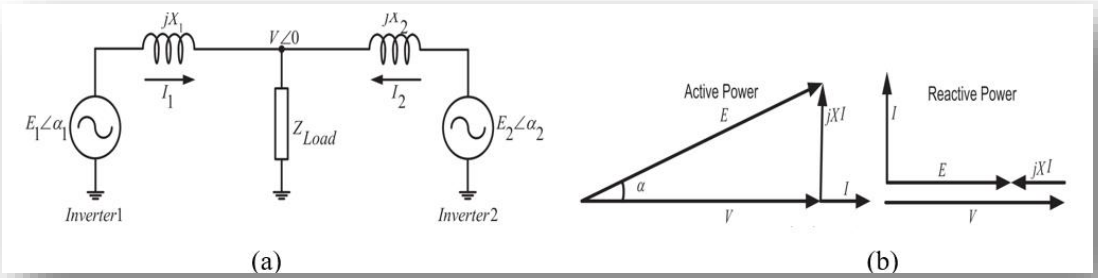


Figure III. 11: (a) Modèle équivalent de deux onduleurs connectés en parallèle au point de bus de couplage commun, (b) le diagramme des phaseurs

Basé sur les équations. (3.4) – (3.5) et petit angle de puissance α **(sin α ≈ α et cos α= 1)**, la puissance active injectée de l'onduleur vers le bus commun est principalement influencée par l'angle de puissance. Par contre, la puissance réactive dépend fortement de la différence d'amplitude entre E et V. De plus, la phase de la tension de sortie de l'onduleur peut être modifiée en modifiant la fréquence de la tension de sortie de l'onduleur.

Par conséquent, le contrôle sans fil des onduleurs connectés en parallèle utilise principalement la chute de fréquence et la chute de tension de sortie pour contrôler la puissance de sortie de l'onduleur.

Un schéma fonctionnel du contrôle de statisme conventionnel est présenté sur la (figure III.12)

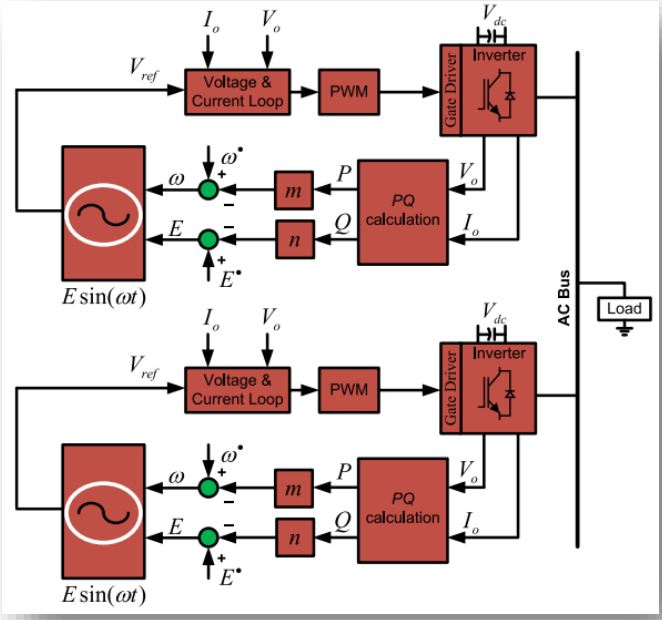


Figure III. 12: Schéma fonctionnel du contrôle de statisme conventionnel.

Les équations des caractéristiques de statisme de P−ω et Q−E sur les figures III.11 (a) et (b) peuvent être écrites comme suit :

$$\omega_k = \omega^* - m_K P_K \quad (3.6)$$

$$E_K = E^* - n_K Q_K \quad (3.7)$$

P_K : La puissance active réelle

Q_K : La puissance réactive réelle,

m_K : le coefficient de statisme de fréquence du K^{ème} onduleur

n_K : le coefficient de statisme de tension du K^{ème} onduleur

ω^* : la fréquence nominale

E^* : l'amplitude de la tension nominale.

Le coefficient de statisme de fréquence et de tension est conçu à partir des équations :(3.6) et (3.7), comme suit :

$$m_K = \frac{\Delta\omega}{P_{k\,max}} \quad (3.8)$$

$$n_K = \frac{\Delta E}{Q_{K\,max}} \qquad (3.9)$$

Où Δω et ΔE sont respectivement l'écart maximal autorisé de fréquence et de tension, P_{Kmax} et Q_{Kmax} sont respectivement les puissances active et réactive nominales fournies par le système.

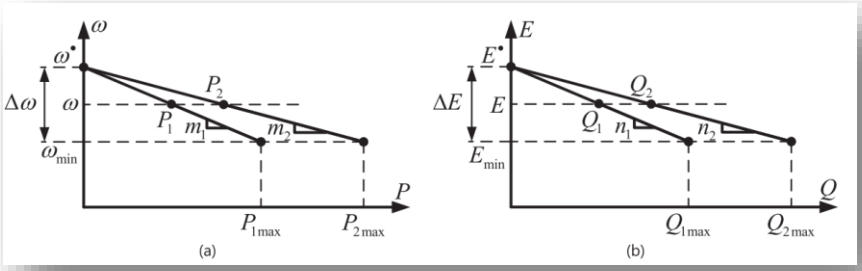


Figure III. 13: (a) P-ω ET (b) Q-E droops

III.6/- Intégration les réseaux de neurones dans le contrôle des micro réseaux

Une technique de contrôle de réseau neuronal artificiel (ANN) a récemment été utilisée pour le contrôle des micro-réseaux, notamment la régulation de la tension et de la fréquence, dans diverses applications [26], y compris la gestion des équipements électriques tels que les onduleurs et les onduleurs bidirectionnels dans les micro-réseaux AC.

Les contrôleurs ANN ont prouvé qu'ils affichent un temps de réponse rapide et un haut niveau de stabilité et de fiabilité. Il a le potentiel d'augmenter la stabilité de la fréquence et de la tension d'un micro-réseau CA, ainsi que la qualité de l'énergie, et d'assurer des transitions rapides entre les modes [27]

Voici quelques façons dont les réseaux de neurones peuvent être intégrés dans le contrôle des micro-réseaux :

- ✓ **Prédiction de la charge:** Les réseaux de neurones peuvent être formés pour prédire la demande future en électricité des consommateurs dans le micro-réseau. Ces prédictions peuvent être utilisées pour ajuster en temps réel la production d'énergie afin de répondre à la demande prévue.
- ✓ **Optimisation de la production d'énergie :** Les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour optimiser la production d'énergie dans le micro-réseau en fonction des conditions météorologiques, de la disponibilité des ressources (comme le soleil et le vent dans les micro-réseaux à énergie renouvelable) et de la demande prévue.
- ✓ **Détection d'anomalies et diagnostic des pannes** : Les réseaux de neurones peuvent être formés pour détecter les anomalies dans le fonctionnement du micro-réseau, telles

que les pannes d'équipement ou les intrusions dans le système. Ils peuvent également être utilisés pour diagnostiquer la cause des pannes et proposer des solutions correctives.

- ✓ **Contrôle adaptatif et prédictif** : Les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour développer des algorithmes de contrôle adaptatifs qui ajustent automatiquement les paramètres du micro-réseau en fonction des changements dans l'environnement et de la charge prévue. De plus, les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour développer des modèles prédictifs qui permettent au système de prendre des décisions anticipées pour optimiser les performances du micro-réseau.

III.6.1- Notion de base sur les réseaux de neurones

Le réseau de neurones est un système de traitement de données inspiré des neurones biologiques. Il peut être dérivé du neurophysiologiste Warren McCulloch et du mathématicien Walter Pitts ; ils ont modélisé un simple réseau neuronal utilisant des circuits électriques en 1943 [28], mais la technologie était limitée à cette époque. Le réseau neuronal a connu des progrès significatifs depuis lors. Il possède une capacité exceptionnelle à tirer un sens de données complexes.

Un ANN (Réseau de Neurones Artificiels) est un ensemble de neurones formels (d'unités de calcul simples, de nœuds processeurs) associés en couches (ou sous-groupes) et fonctionnant en parallèle.

Dans un réseau, chaque sous-groupe fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse au sous-groupe suivant. L'information donnée au réseau va donc se propager couche par couche, de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant ne soit par aucune, soit par plusieurs couches intermédiaires (dites couches cachées).

III.6.1.1- Le neurone biologique

Les neurones sont des cellules du système nerveux. Ces cellules nerveuses sont responsables de la réception et de la transmission des influx nerveux. Le système nerveux compte plus de 1000 milliards de neurones interconnectés entre eux, les neurones ne sont pas tous identiques, leurs comportements les diffèrent en fonction de leurs positions dans le cerveau. Un neurone peut se décomposer en trois régions principales :

- ➢ Un corps cellulaire qui contient le noyau, la machine biochimique qui produit les enzymes et d'autres molécules qui contribuent à la survie des cellules nerveuses
- ➢ Des dendrites qui sont des parties multi-ramifiées qui reçoivent les influx nerveux, leur taille est de quelques dizaines de micromètres

- Un axone unique : les axones sont les structures allongées qui transmettent les influx à partir du corps cellulaire. L'axone se ramifie à son extrémité où il se connecte aux dendrites des autres neurones, sa taille peut varier de quelques millimètres à plusieurs mètres
- Synapse : c'est l'endroit où se fait la connexion entre deux neurones, donc entre une dendrite et un axone. Anatomiquement, il s'agit d'une fente. L'une de ses berges est la terminaison d'un axone, l'autre est l'origine d'une dendrite. L'axone d'un neurone est donc lié à la dendrite du neurone suivant. Les synapses possèdent une sorte de mémoire qui leur permet d'ajuster leur fonctionnement, elles facilitent ou non le passage des influx nerveux, cette plasticité est à l'origine des mécanismes d'apprentissage

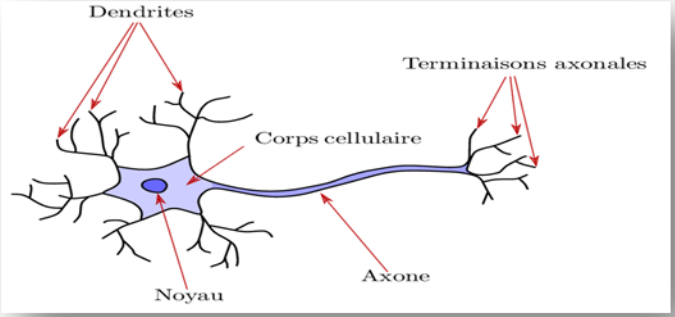


Figure III. 14: Un neurone biologique

III.6.1.2- Le neurone formel

Un neurone formel ou bien artificiel est une modélisation mathématique du neurone biologique basée sur la structure des neurones à l'intérieur d'un cerveau humain pour modéliser et résoudre les problèmes complexes.

Alors un neurone est une fonction mathématique non linéaire et bornée, dont les variables de cette fonction sont appelées des « entrées » et la valeur de la fonction est appelée sa « sortie ».

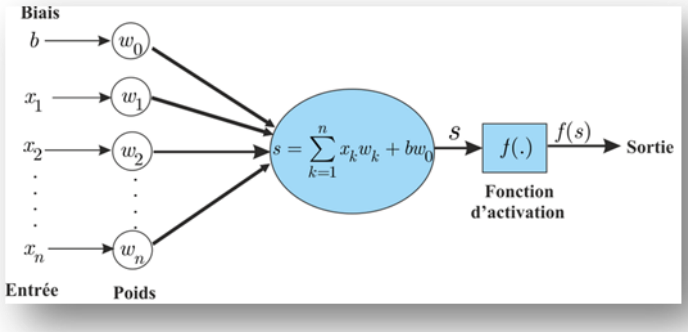


Figure III. 15: Modèle du neurone artificiel

- x1, x2 ,…, xj,…. xn sont les entrées externes, elles proviennent soit des sorties d'autres neurones soit de stimuli sensoriels (capteur visuel, sonore,...)
- Y est la sortie
- w_0, w_1……, wn sont les poids synaptiques du neurone associés à chaque entrée, ils représentent l'efficacité synaptique du neurone biologique (wj<0 : synapse inhibitrice, wj>0 : synapse excitatrice) ; ces poids pondèrent les entrées et peuvent être modifiés par apprentissage
- Biais : généralement prend les valeurs +1 ou bien -1, il permet de varier le seuil de déclanchement du neurone et l'ajustement des poids et du biais lors de l'apprentissage
- Le noyau : intègre toutes les entrées et le biais et calcule la sortie en utilisant une fonction d'activation qui est souvent non linéaire [29]

Cerveau → réseau de neurone
Neurone → élément processeur
Dendrites → somme pondérée
Corps cellulaire → fonction d'activation
Axone → fonction de sortie
Synapse → poids

Tableau III. 1: Compatibilité entre le neurone et un model artificiel

III.6.2- Fonctions d'activation

La fonction de transfert ou la fonction d'activation dans un réseau de neurones artificiels est en général, une fonction non linéaire monotone croissante. Par ailleurs, les fonctions sont de qualités diverses : elles peuvent être déterministes, continues, discontinues ou aléatoires [30].

Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de d'activation. Les plus courantes sont :

III.6.2.1- Fonction à seuil

La fonction de Heaviside (fonction échelon, fonction marche d'escalier) est une fonction H discontinue prenant la valeur 0 pour tous les réels négatifs et la valeur 1 partout ailleurs :

$$F(X) = \begin{cases} 0 \text{ si } X < 0 \\ 1 \text{ si } X \geq 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

- Fonction à seuil symétrique :

La sortie peut avoir deux états distincts (-1 et +1) selon le dépassement d'un Seuil

$$F(X) = \begin{cases} -1 \text{ si } X < 0 \\ 1 \text{ si } X \geq 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

III.6.2.2- Fonction linéaire :

La fonction identité est l'application qui n'a aucun effet lorsqu'elle est appliquée à un élément : elle renvoie toujours la valeur qui est utilisée comme argument

$$F(X) = X \quad (3.12)$$

III.6.2.3- Fonction sigmoïde :

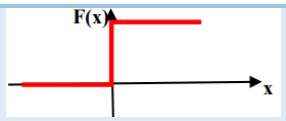
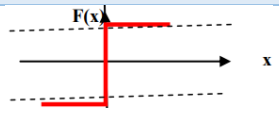
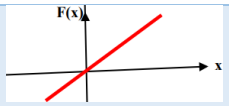
Plus connue. Elle est souvent utilisée dans les réseaux de neurones. L'un de ses avantages est sa dérivabilité.

- Sigmoïde (logistique) :

$$F(X) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3.13)$$

- Tangente hyperbolique :

$$F(X) = \frac{e^{x}-e^{-x}}{e^{x}+e^{-x}} \quad (3.14)$$

Nom de la fonction	L'allure
Seuil	
seuil symétrique	
Linéaire	

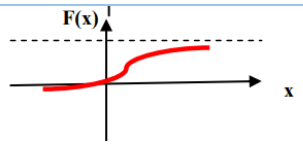
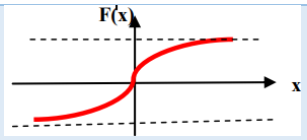
Sigmoïde	
Tangente hyperbolique	

Tableau III. 2: Fonctions de transfert f(x)

III.6.3- Architectures des réseaux de neurones

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Il existe plusieurs architectures réseau, on peut citer:

III.6.3.1- Réseaux monocouche

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids, qui ne comporte qu'une seule couche de neurones dont la fonction d'activation est de type « pas unitaire », ce qui implique un seul vecteur de poids. Toutes les unités de l'entrée sont connectées à celles de la sortie.

Ce réseau fonctionne comme un classeur linéaire, autrement dit, il peut seulement séparer ou classer les données linéairement séparables grâce à sa structure [31]

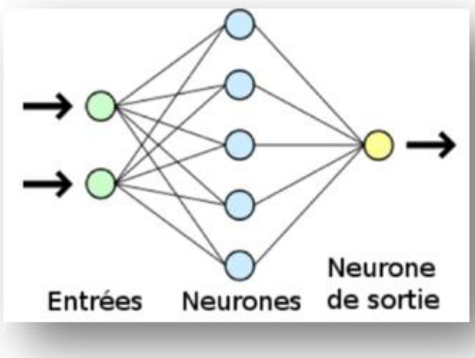


Figure III. 16: Réseau de neurones monocouche

III.6.3.2- Réseaux multicouches

C'est le réseau de neurones statique le plus utilisé. Les neurones sont arrangés par couche. Les neurones de la première couche reçoivent le vecteur d'entrée, ils calculent leurs sorties qui sont transmises aux neurones de la seconde couche qui calculent eux-mêmes leurs sorties et

ainsi de suite de couche en couche jusqu'à celle de sortie. Selon leur disposition, on trouve deux types de couches :

- La couche de sortie ou bien la couche de décision où on récupère les résultats finaux de traitement, le nombre de neurones sur la couche de sortie dépend des résultats qu'on veut obtenir. Cette couche peut être représentée par un perceptron simple ou bien par un neurone avec une fonction d'activation linéaire appelé ADALINE (Adaptive Linear Neuron) [32].
- Les couches cachées (couches de prétraitement), sont des couches placées entre les entrées et la couche de sortie, elles sont de type perceptron simple et cela, pour que ces couches puissent préparer les données en utilisant des fonctions d'activation non-linéaires.

Chaque neurone dans la couche cachée est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante, et il n'y a pas de connexions entre les cellules d'une même couche.

Sa topologie permet de résoudre des problèmes non linéairement séparables et il suit un apprentissage supervisé.

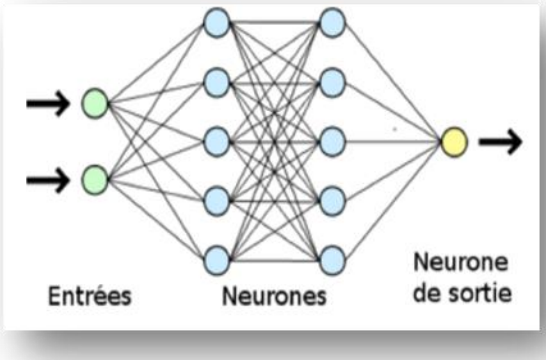


Figure III. 17: Réseau multicouche

A) Réseau multicouche classique.

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avalent

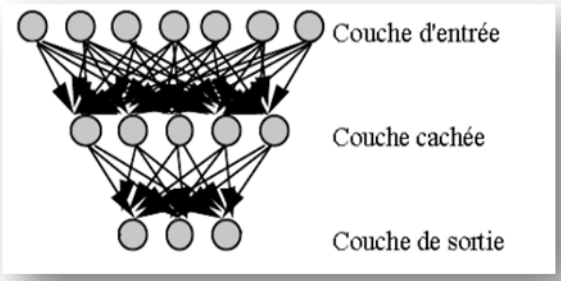


Figure III. 18: Réseau multicouche classique

B) Réseau à connexions locales :

C'est une structure multicouche. Mais comme la rétine, elle conserve une certaine structure topologique. Chaque neurone maintient le contact avec un petit nombre de neurones locaux Dans la couche en aval.

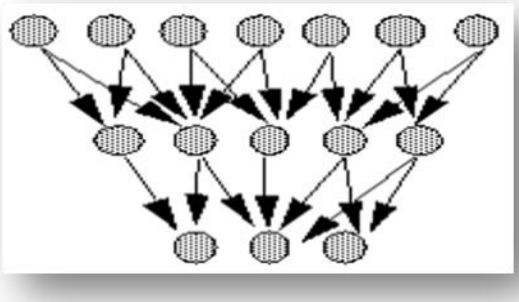


Figure III. 19: Réseau à connexions locales.

C) Réseau à connexions récurrentes

Ce sont des réseaux dans lesquels l'information se propage de couche en couche avec retour en arrière possible.

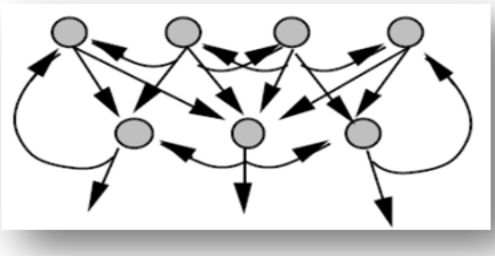


Figure III. 20: Réseau à connexions récurrentes

D) Réseau à connexions complexes :

Réseau à connexion complète : c'est la structure d'interconnexion la plus générale. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau.

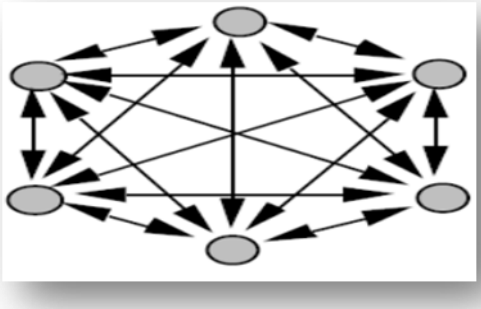


Figure III. 21: réseau à connexions complète.

III.6.4- Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. D'une autre manière, l'apprentissage consiste à calculer les paramètres de sorte que les sorties du réseau soient aussi proches que possible des résultats recherchés.

Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions. L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans le but d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience.

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, deux classes principales ont été définies selon lesquelles l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé. Cette distinction est basée sur la forme des exemples d'apprentissage. Dans le cas de l'apprentissage supervisé, les exemples sont des couples (Entrée, Sortie associée) alors que l'on ne dispose que des valeurs (Entrée) pour l'apprentissage non supervisé.

III.6.4.1- Apprentissage supervise

Pour les réseaux à apprentissage supervisé, on présente au réseau : à la fois les entrées et les sorties souhaitées pour ces entrées. Le réseau doit ajuster ses poids de façon à réduire l'écart entre la réponse désirée et la sortie du réseau. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère de performance soit satisfait de la façon suivante :

- Dans le cas d'une discordance entre la réponse obtenue par le réseau est la réponse désirée, le poids synaptique des neurones actifs doit être affaibli.
- Par contre, là où il y a correspondance, le processus consiste à augmenter le poids des neurones actifs. Par conséquent, un modèle neuronal à règle d'apprentissage supervisé passe par une procédure de calibration des paramètres libres pendant la phase

d'apprentissage. Ensuite, les circuits mémorisés seront généralisés sur les entrées aléatoires pendant la phase de décision

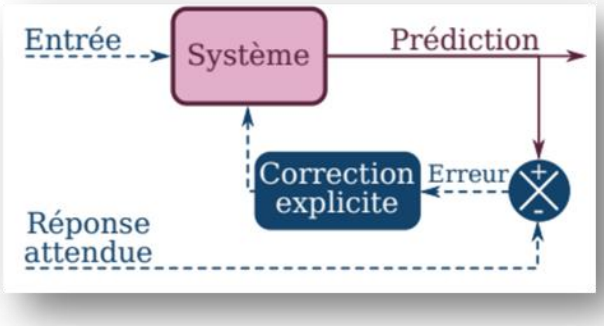


Figure III. 22: Bloc de l'apprentissage supervisé [33]

III.6.4.2- Apprentissage non supervisé

Pour les réseaux à apprentissage non supervisé, aucune information sur la réponse désirée n'est fournie au réseau. On présente une entrée au réseau et on le laisse s'évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise. Ce comportement est connu sous le nom « auto organisation », Les algorithmes basés sur cette règle d'apprentissage sont alimentés, au cours de la phase d'apprentissage par une base d'apprentissage constituée d'un ensemble de stimuli avec une certaine redondance. Ces algorithmes d'apprentissage sont souvent appelés algorithmes « clustering », ce qui signifie regroupement et séparation

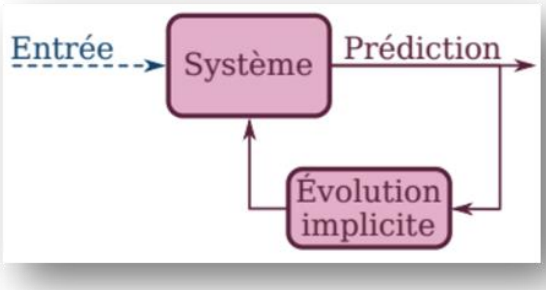


Figure III. 23: Bloc de l'apprentissage non supervisé [33]

III.6.5- Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurone

Le réseau neuronal peut exécuter n'importe quelle fonction non linéaire jusqu'à ce qu'il atteigne un certain degré de fiabilité. Il peut également implémenter des fonctions dynamiques et avoir n'importe quel nombre d'entrées et de sorties. Nous énumérerons les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones artificiels

Avantages des réseaux de neurones	Inconvénients des réseaux de neurones
- La capacité d'exprimer n'importe quelle fonction, qu'elle soit linéaire ou non, simple ou complexe - Une faculté d'apprendre à partir d'exemples représentatifs par rétro propagation d'erreurs. L'apprentissage (ou la construction de modèles) se fait automatiquement -Insensible aux données non fiables ou au bruit - Facile à utiliser, le travail personnel exigeait beaucoup moins qu'une analyse statistique classique. Aucune compétence en mathématiques et calculs statistiques requis - Moins de mauvais comportements en cas de petite quantité de données -Pour un utilisateur novice, l'apprentissage est plus facile à comprendre que la complexité des statistiques multivariées	- Il n'y a pas de méthode systématique de définir la topologie optimale du réseau et le nombre de neurones à placer dans la couche cachée - Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage jouent un rôle important dans la vitesse de convergence - Le problème du sur-apprentissage qui ne se généralisera pas. - Les connaissances acquises par le réseau neuronal sont encodées par la valeur du poids synaptique, le réseau neuronal est donc une boîte noire et les utilisateurs ne peuvent pas comprendre ces connaissances [34].

Tableau III. 3: Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurone

III.7/- Conclusion

Nous avons commencé dans ce chapitre par une structure de contrôle hiérarchique d'un microgrid AC et discutons de la modélisation et du contrôle d'un micro-réseau dans les cas connectés au réseau et isolés, en mentionnant les types de contrôle des convertisseurs de puissance dans les deux cas précédents en termes de structure générale, leur régulation de tension et courant

Enfin, nous avons abordé les réseaux de neurones, dans le but de l'intégrer dans les microgrid, avec un petit aperçu de leur fonctionnement, nous continuerons donc le processus dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : Application des réseaux de neurones au contrôle des micro réseaux

IV.1/- Introduction

La simulation de contrôle hiérarchique avec réseaux de neurones d'u micro-réseaux isolés est la base de l'optimisation de systèmes énergétiques étudier. Comme dans tout réseau électrique, il est essentiel de gérer les flux d'énergie afin de garantir un équilibre entre la production et la consommation avec un nombre restreint d'unités de production.et contrôler les diverses couches de contrôle pour une régulation constante de la tension et de la fréquence à terme, afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle du micro-réseau.

- Le contrôle hiérarchique permet une coordination efficace entre différents niveaux de gestion, assurant une stabilité et une réactivité accrues.
- Les réseaux de neurones, quant à eux, apportent des capacités d'apprentissage et d'adaptation avancées, permettant d'améliorer la prévision de la demande, la détection des anomalies et l'optimisation des ressources. La simulation de ces systèmes complexes permet d'évaluer les performances et la fiabilité des stratégies de gestion énergétique avant leur mise en œuvre réelle, réduisant ainsi les risques et les coûts.

Ce chapitre explore les techniques de simulation employées pour intégrer le contrôle hiérarchique et les réseaux de neurones dans les micro-réseaux isolés

IV.2/- Model de microgrid étudié

La simulation de micro-réseaux isolés est essentielle pour concevoir, analyser et optimiser des systèmes énergétiques autonomes en utilisant des outils de modélisation avancés et des algorithmes de- machine Learning-. Ces micro-réseaux, souvent utilisés dans des régions éloignées sans connexion au réseau principal, doivent gérer efficacement la génération, le stockage et la distribution de l'énergie.

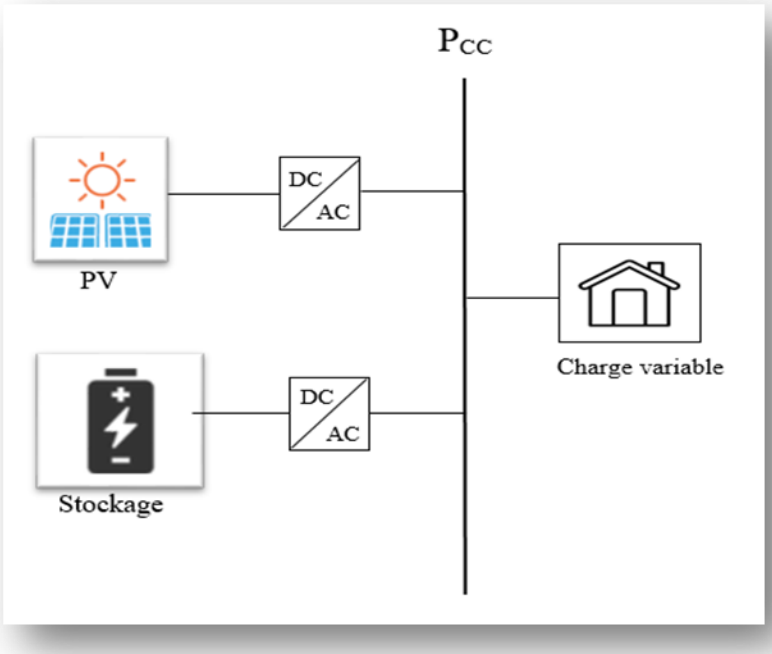


Figure IV. 1: Structure de Micro-réseau

Le fonctionnement d'un micro-réseau basé sur un onduleur déconnecté du réseau principal (mode îloté), en utilisant la technique de contrôle du statisme, l'exemple dans la figure IV.2

Le contrôle du statisme est une technique bien établie pour contrôler un réseau autonome. En fait, le contrôle du statisme de puissance active/fréquence (P/F) et de puissance réactive/tension (Q/V) imite le fonctionnement des générateurs synchrones dans un système de transmission. Avec la technique de contrôle du statisme, les PLL (Phase Lock Loop) ne sont pas nécessaires pour réaliser une synchronisation à l'échelle du système car tous les onduleurs atteignent la même fréquence. De plus, le partage de puissance entre chaque onduleur peut être réalisé puisque chaque onduleur fournit de la puissance proportionnellement à sa capacité.

Le microgrid se compose de :

- Deux sous-systèmes d'onduleurs parallèles, d'une puissance nominale de **500 kW**, **300 kW** respectivement, connectés au bus PCC (**Point-of-Common-Coupling**).
- Le système de contrôle secondaire du micro-réseau modifie les points de consigne de statisme P/F et Q/V des onduleurs afin de ramener la fréquence et la tension du microgrid à leurs valeurs nominales (respectivement 50 Hz et 600 Volts).
- Chaque sous-système d'onduleur contient un convertisseur de puissance triphasé à deux niveaux, un filtre LC, un transformateur 480/600 V ainsi qu'une source DC idéale pour représenter la liaison DC d'un système de production d'énergie renouvelable typique (tel

qu'un générateur photovoltaïque, une éolienne). Système de stockage d'énergie par batterie).

- Chaque sous-système comprend également un système de contrôle et un générateur PWM alimentant l'onduleur.

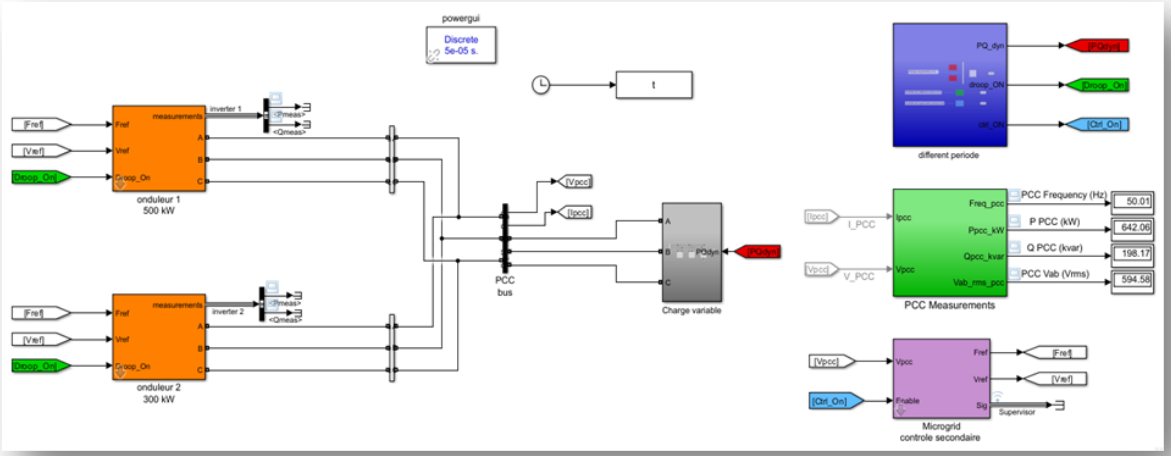


Figure IV. 2: Modèle de microgrid dans SIMULINK

IV.3/- Modèle d'onduleur

Le modèle d'onduleur se compose de composants de commande et d'onduleur connectés à un filtre LC et au reste du micro-réseau, comme illustré dans la figure IV.3

Le modèle utilisé est un bloc fourni par l'environnement SIMULINK. Ce bloc accepte un signal de référence PWM qui agit comme signal de contrôle pour décider du comportement de l'onduleur.

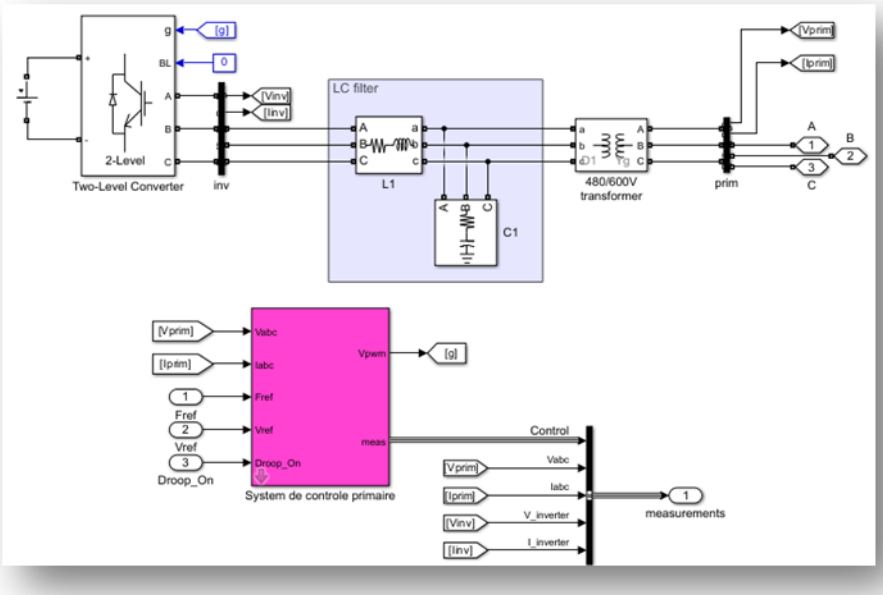


Figure IV. 3: Contrôle primaire de l'onduleur dans SIMULINK

Le bloc de contrôle est une implémentation du contrôleur primaire en mode de formation du réseau (grid-forming) abordé dans le chapitre précédent.

La figure IV.4 montre les principaux composants du système de contrôle de l'onduleur

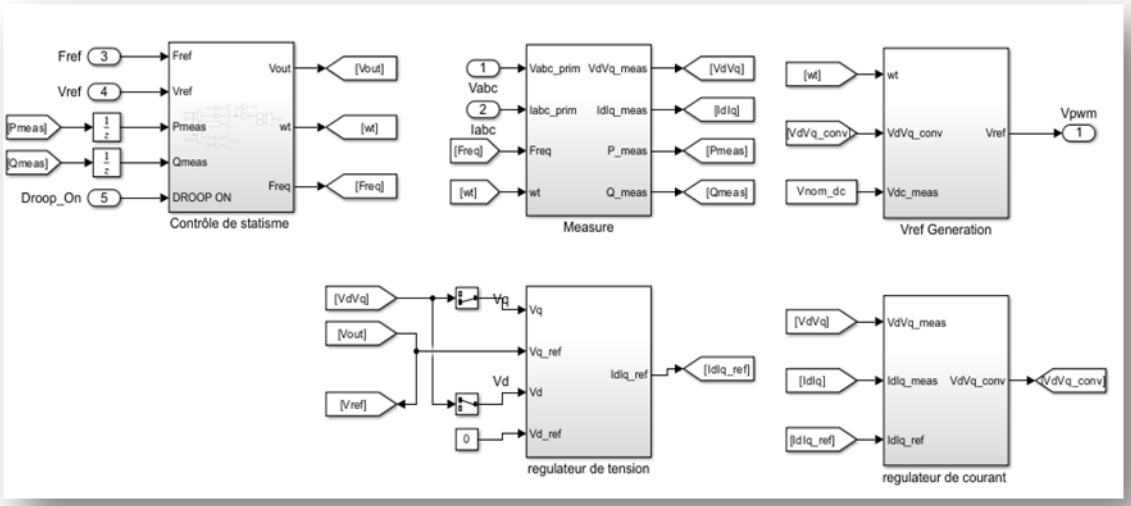


Figure IV. 4: Système de contrôle primaire

Les principaux composants du système de contrôle de l'onduleur sont :

IV.3.1-Contrôle de statisme :

Le statisme P/F est réglé sur 1 %, ce qui signifie que la fréquence du micro-réseau peut varier de 50,3 Hz (l'onduleur ne produit aucune puissance active) à 49,7 Hz (l'onduleur produit sa puissance active nominale). Le statisme Q/V est réglé sur 4 %, ce qui signifie que la tension du micro-réseau au niveau du bus PCC peut varier de 612 Vrms (l'onduleur produit sa pleine puissance inductive) à 588 Vrms (l'onduleur produit sa pleine puissance capacitive)

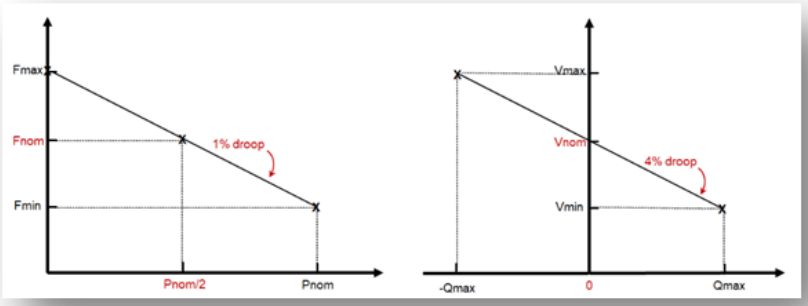


Figure IV. 5: Les caractéristiques de statisme du contrôle de l'onduleur

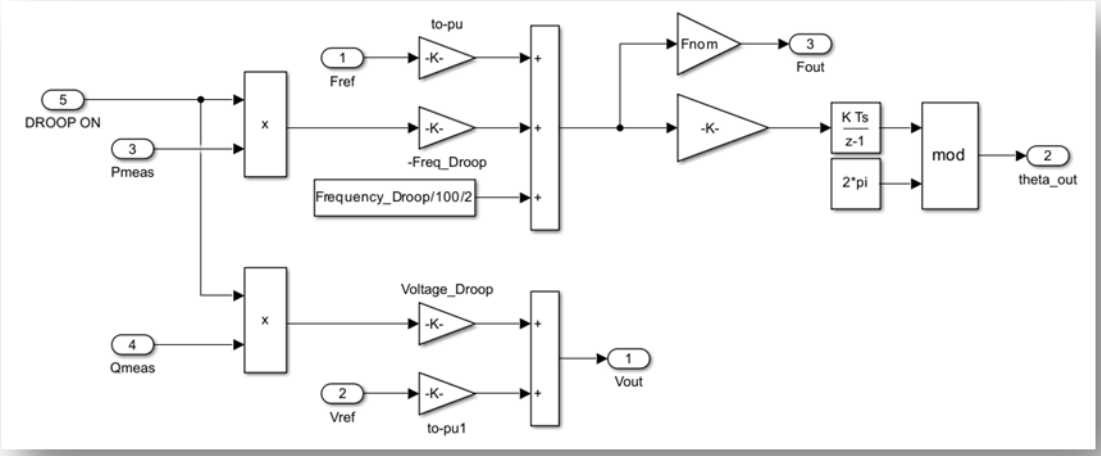


Figure IV. 6: Contrôle de statisme

IV.3.2-Mesures :

Sur la base de la valeur de fréquence donnée par le contrôle Droop, le sous-système de mesure calcule la puissance active et réactive générée par l'onduleur. Il calcule également les composantes d-q des tensions et courants triphasés sur le bus PCC du micro-réseau.

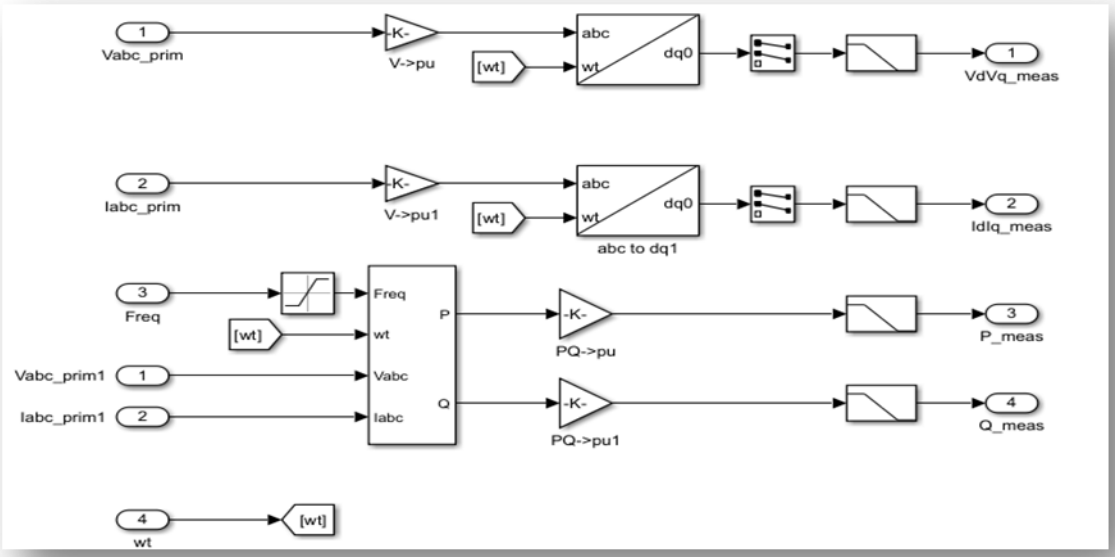


Figure IV. 7: Sous-système de mesure

IV.3.3-Régulateurs de tension :

La tension de référence V_{ref} donnée par le contrôle de statisme est transmise aux régulateurs de tension. Les régulateurs traitent les tensions dq mesurées et la tension de référence Vref pour générer les courants de référence I_{d_ref} et I_{q_ref}.

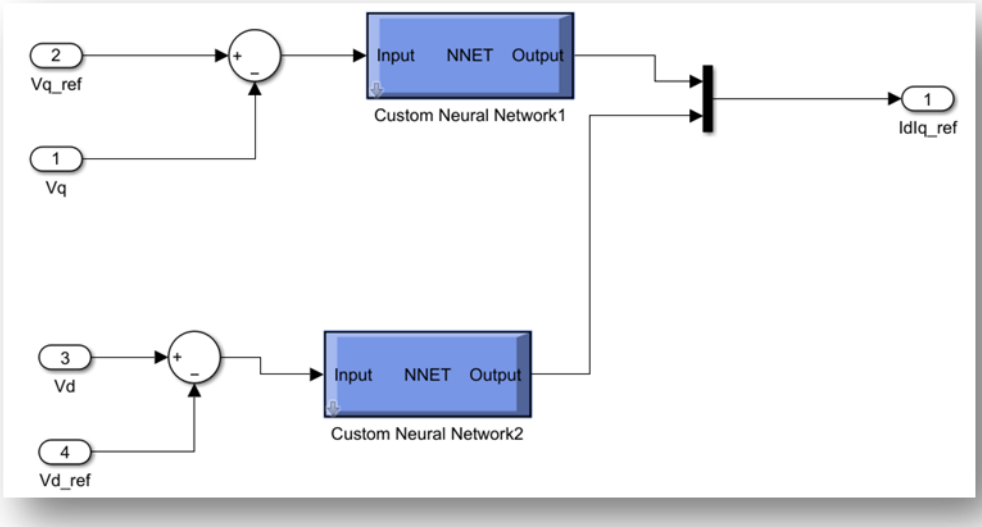


Figure IV. 8: Régulateur de tension

IV.3.4-Régulateurs de courant :

La figure IV.9 montre l'implémentation du contrôleur de courant. L'erreur entre IdIq référence et IdIq mesurés est envoyée au contrôleur PI et le contrôleur PI donne la sortie pour la référence Vd, Vq et elle est utilisée comme tension de référence du bloc PWM.

$$Vd_{conv} = RI_d - \omega LI_q + L\frac{dI_d}{dt} + V_d \qquad \text{IV.1}$$

$$Vq_{conv} = RI_q + \omega LI_d + L\frac{dI_q}{dt} + V_q \qquad \text{IV.2}$$

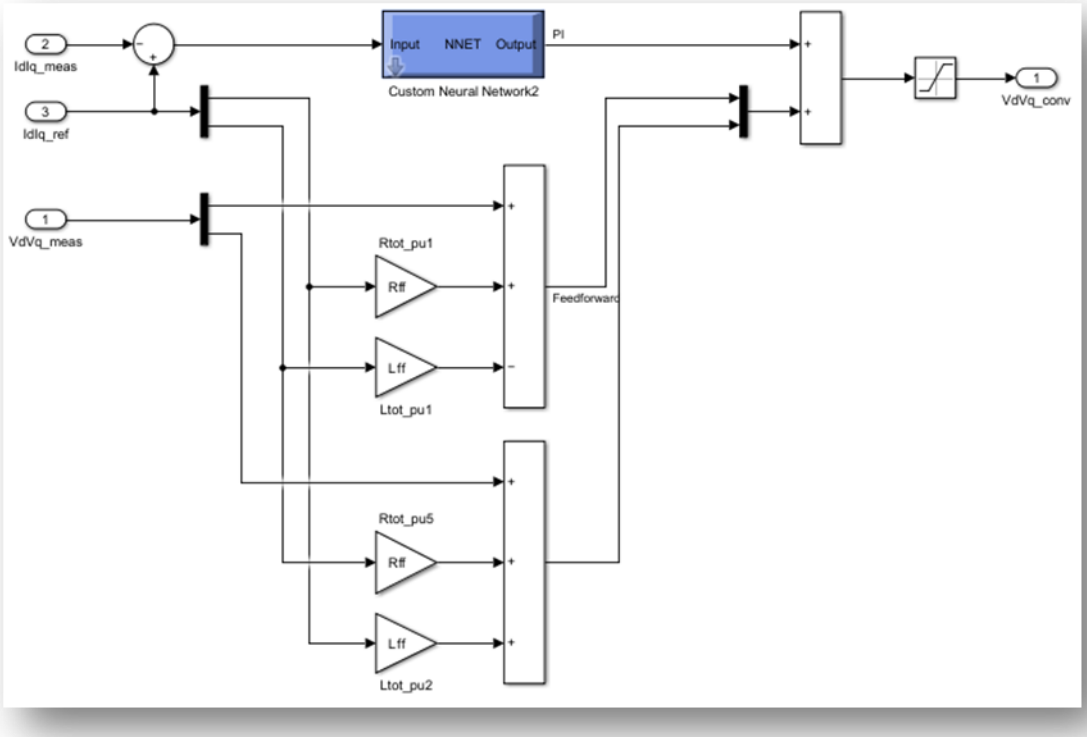


Figure IV. 9: Régulateur de courant

IV.3.5-Génération Vref :

À l'intérieur du bloc PWM, la forme d'onde sin de référence requise est générée en fonction du signal Vd, Vq et de l'angle de phase mesuré du système AC. Le signal Vd, Vq est normalisé par le facteur suivant :

F_{nv} =Facteur normalisé du signal V_d_V_q ;

$$F_{nv} = \frac{0.5\, V_{dc_meas}}{V_{nom_sec} * sqrt(^2/_3)} \qquad \text{IV.3}$$

Où **V_{dc_mes}=1000V** et **V_{eff_sec}= 480V.**

Ensuite, ce signal de tension de référence est envoyé à l'unité PWM standard et génère les impulsions requises pour le pont onduleur. Étant donné que le transformateur ΔY est inclus dans le système VSC, il existe un déphasage de -pi/6 radian dans la tension, qui doit être corrigé.

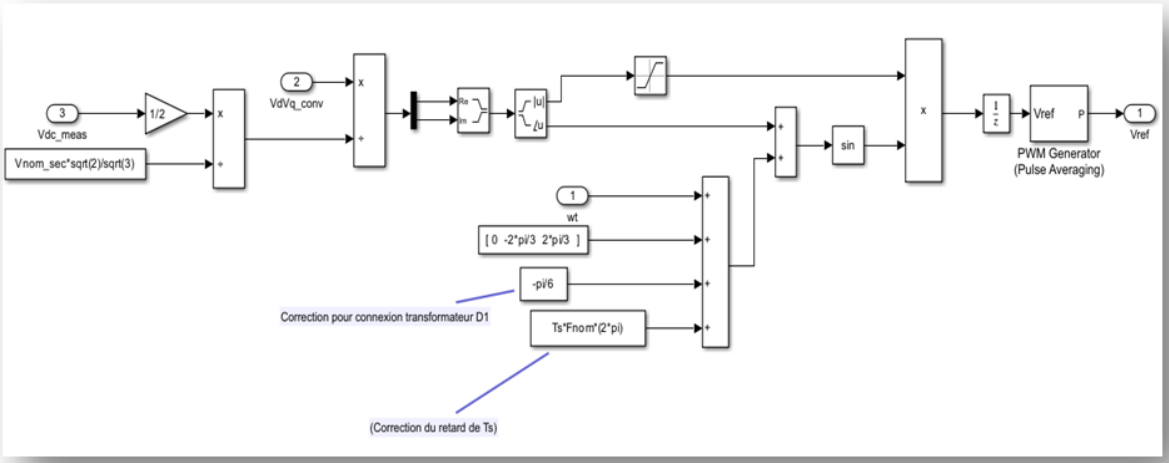


Figure IV. 10: Génération de signal de référence de tension et PWM

IV.4/-Contrôle secondaire

Le contrôle secondaire joue un rôle crucial dans la gestion des microgrids isolés, également appelés microgrids en mode îlot. Il intervient après les contrôles primaire pour assurer une stabilité de la fréquence et de la tension à long terme et pour optimiser l'efficacité opérationnelle du microgrid.

- *Régulation de la Fréquence à Long Terme*

En mode îlot, le contrôle secondaire est responsable de maintenir la fréquence du microgrid proche de sa valeur nominale (généralement 50 Hz). Après que le contrôle primaire a effectué des ajustements rapides pour stabiliser immédiatement la fréquence, le contrôle secondaire prend le relais pour corriger les écarts persistants de fréquence dus à des déséquilibres continus entre la production et la consommation d'énergie.

- *Régulation de la Tension*

Le contrôle secondaire veille également à ce que la tension dans le microgrid soit maintenue dans des limites acceptables, assurant ainsi la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique.

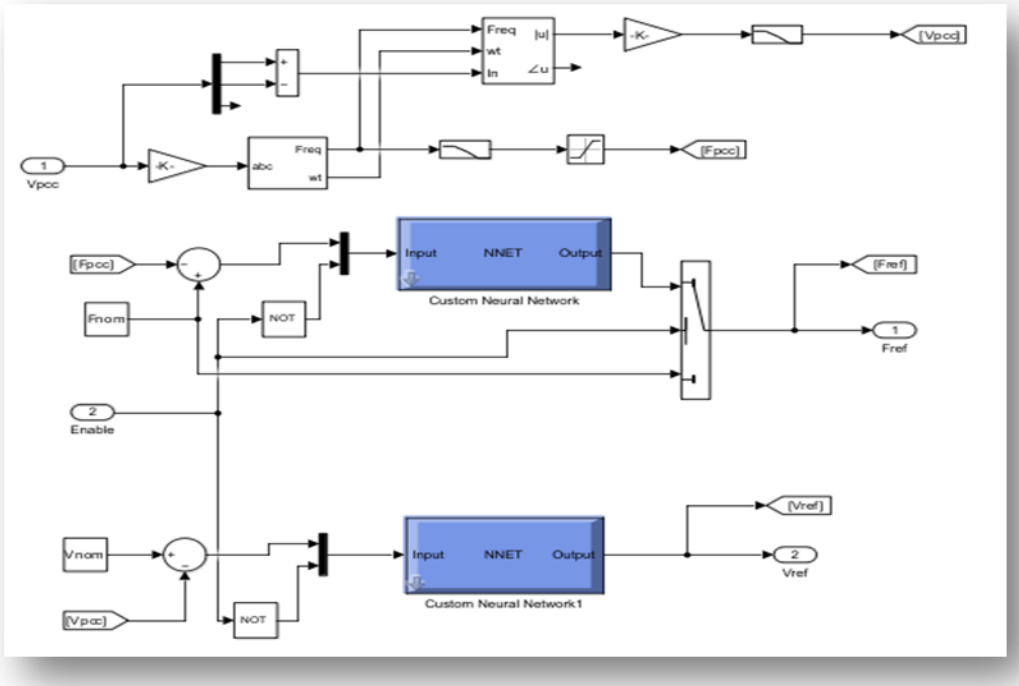


Figure IV. 11: Sous-système de contrôle secondaire

IV.5/- Implémentation de réseaux de neurone

On cherche à remplacer ce système pi en utilisant la technique des réseaux de neurones. Le principe est montré dans la figure ci-dessous:

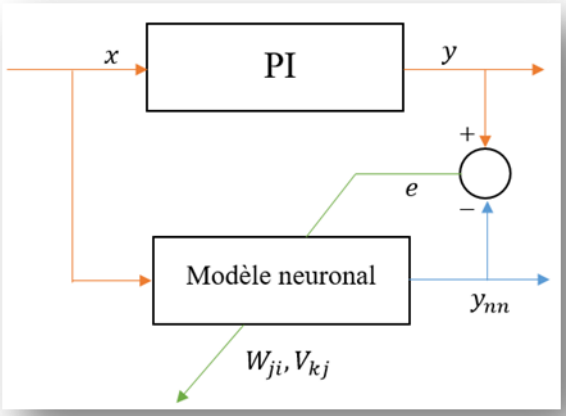


Figure IV. 12: Modélisation neuronale

Pour créer un bloc de réseaux de neurones vous devez suivre et connaître ces étapes :

1. Architecture
2. Trainage
3. Teste

IV.5.1/- Bloc ANN pour la régulation de fréquence (f_{ref})

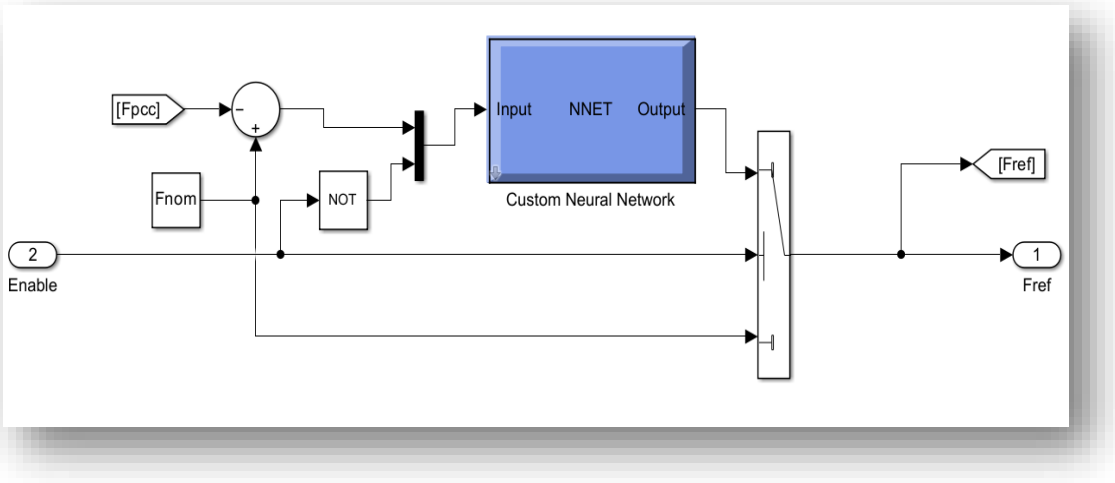


Figure IV. 13: Les entrées et la sortie d'un système de régulation de fréquence (f_{ref})

- **1er étape : Architecture**

un programme sous 'script' [Annexe A] est exporté au workspace pour déterminer les entrées et la sortie de système avec les nombre de couche et leur fonction d'activation

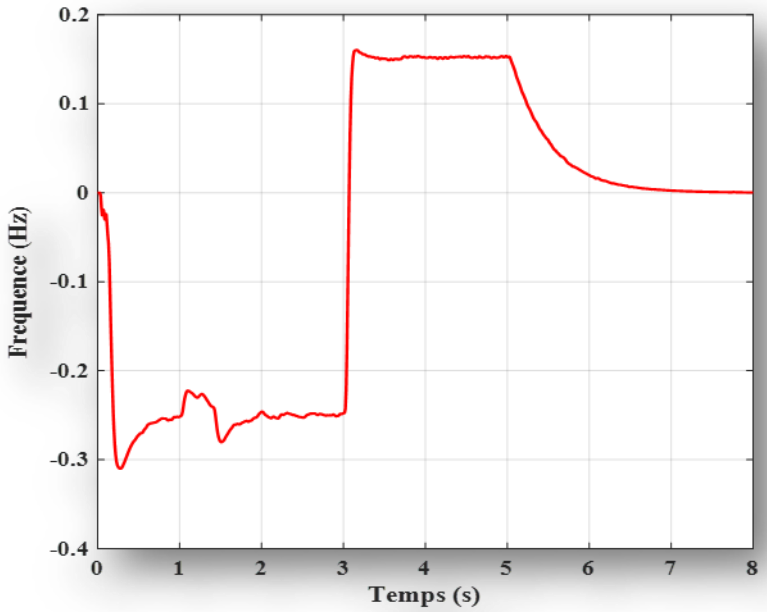


Figure IV. 14: L'erreur entre fpcc et fnom

- **2eme étape : Apprentissage et teste**

Ecrire un programme pour fait le trainage de réseau de neurone [annexe B]

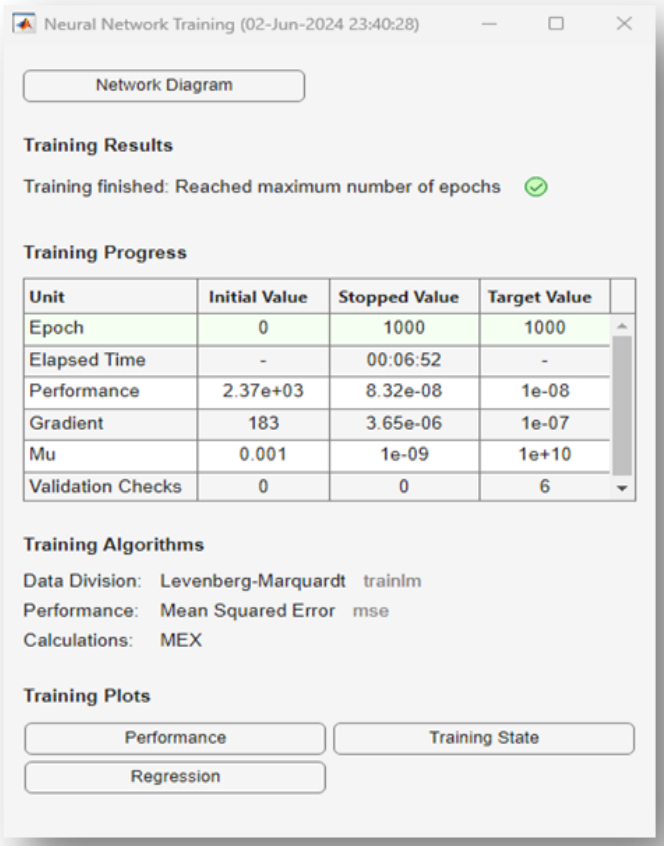


Figure IV. 15: Le trainage de réseaux de neurone

La fonction ‘gensim’ créer le block Simulink de notre model ANN avec un couche caché et couche de sortie comme nous indique dans le programme

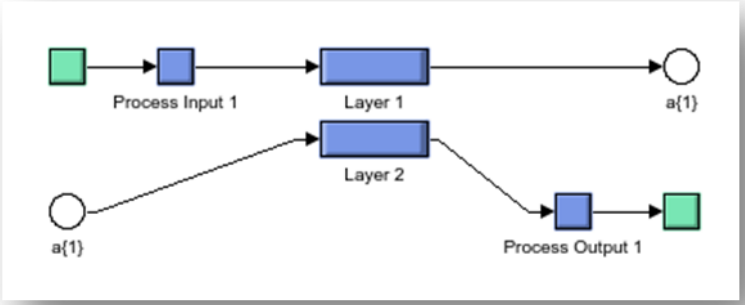


Figure IV. 16: Structure d'un réseau neurone avec une seule couche cachée

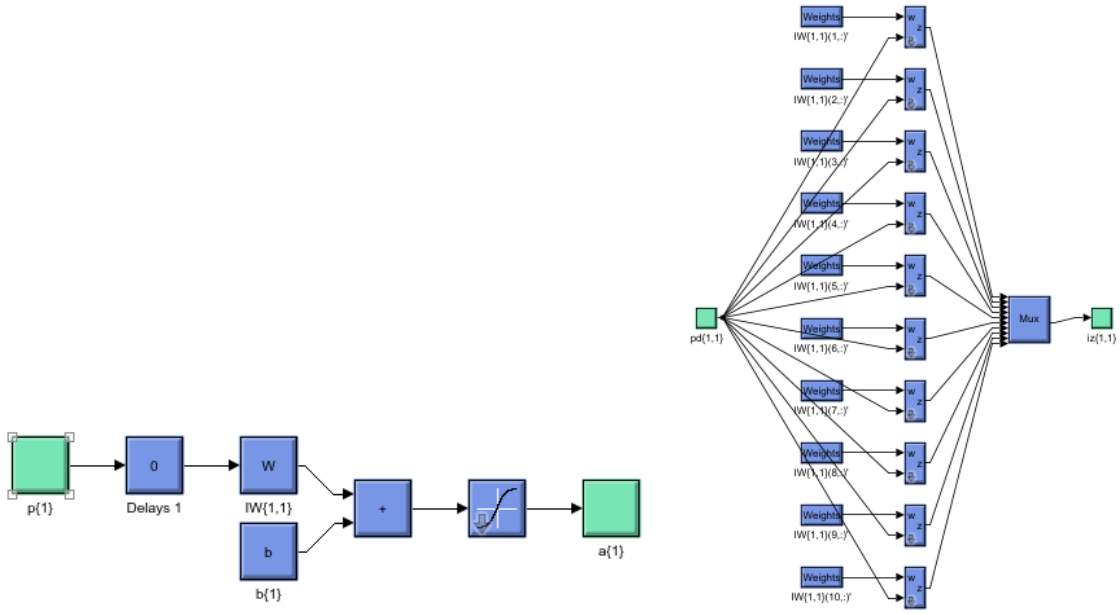


Figure IV. 17: Le nombre de neurones ainsi la fonction d'activation utilisés dans la couche cachée

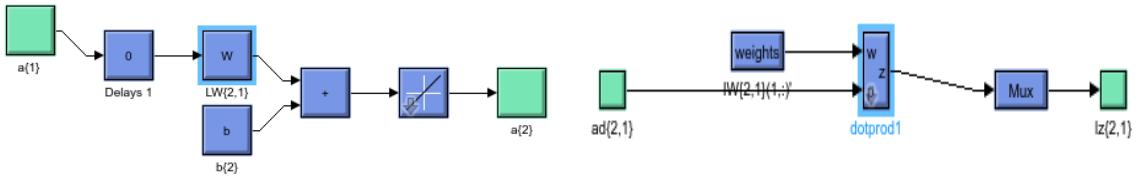


Figure IV. 18: Le nombre de neurones ainsi la fonction d'activation utilisés dans la couche de sortie

Comme montre la figure IV.12 Le trainage calculer l'erreur entre La sortie de Ann et la sortie de PI ,et ça continue de changer les biais et les poids Jusqu'à ce qu'une erreur soit égale à zéro, la figure IV.19

Le tableau IV.1 ci-dessous montre les valeurs de biais et poids obtenues à partir du processus de trainage

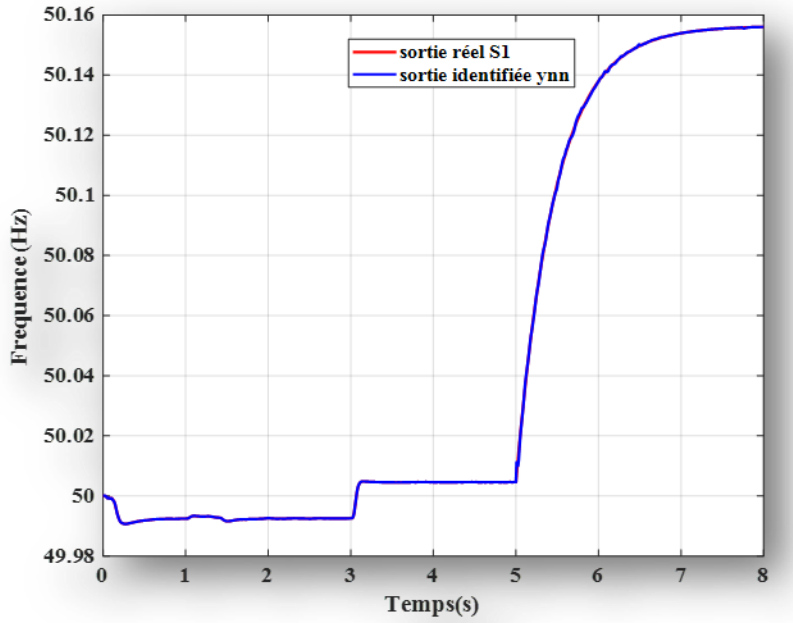


Figure IV. 19: Sortie du réseau de neurone avec trainage

Les poids entre la couche d'entrée et la couche cachée (W)		Les biais De couche cachée (bW)	Les poids entre la couche cachée et la couche de sortie (V)	Les biais de couche de sortie (bV)
-11.7599	-6.1107	6.7587	-0.0020	33.2025
15.0333	-2.5901	6.2797	0.0014	
10.4581	-10.2160	2.4892	-1.9617	
6.8572	-9.6527	5.0526	1.0386	
10.3493	9.0878	-2.1935	-9.6503	
16.8832	5.9490	-4.1837	-6.3780	
-8.3640	-8.6779	1.9024	1.5758	
6.1903	8.3697	6.1792	10.4985	
-10.3081	-9.4763	2.3911	-16.5993	
16.8799	-4.8783	6.6432	6.3806	

Tableau IV. 1: Les paramètre de block ANN 1

IV.5.2/- Bloc ANN pour la régulation de tension (V_{ref})

Dans ce bloc, nous avons exécuté le même programme et les mêmes étapes [annexe A, B]. Nous avons modifié uniquement les entrées et les sorties comme montre la figure IV.20

- **1er étape : Architecture**

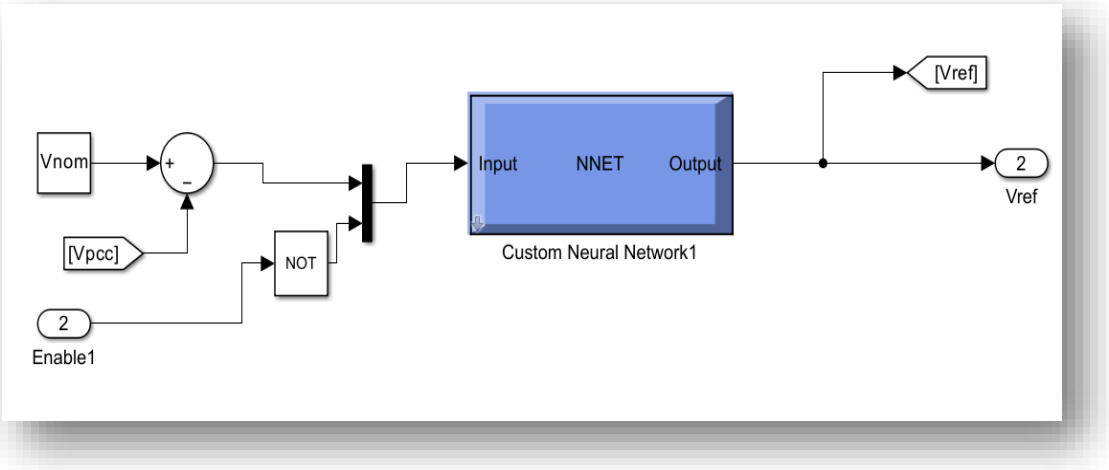


Figure IV. 20: Les entrées et la sortie d'un système de régulation de tension (Vref)

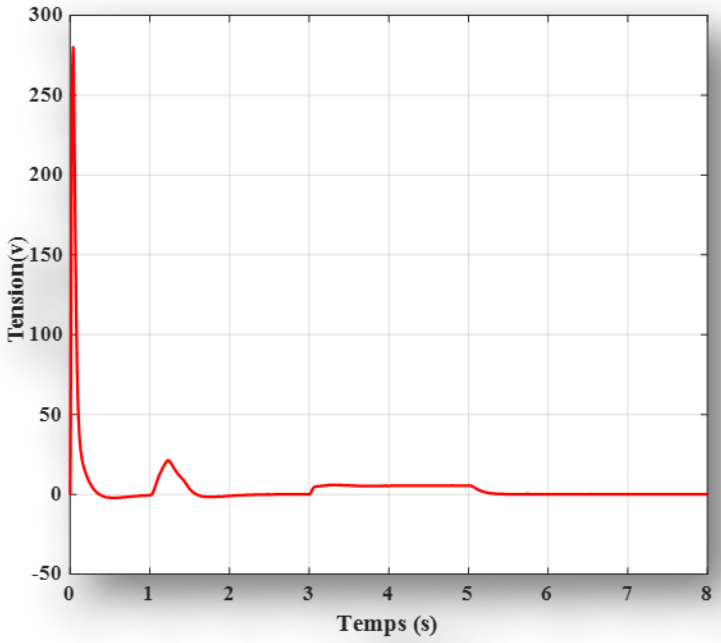


Figure IV. 21: L'erreur entre Vpcc et Vnom

- **2eme étape : Apprentissage et teste**

L'erreur entre la sortie de PI et la sortie de réseaux de neurone ≈ 0, les valeurs des poids et biais qui réalisent cette opération sont dans le tableau IV.2

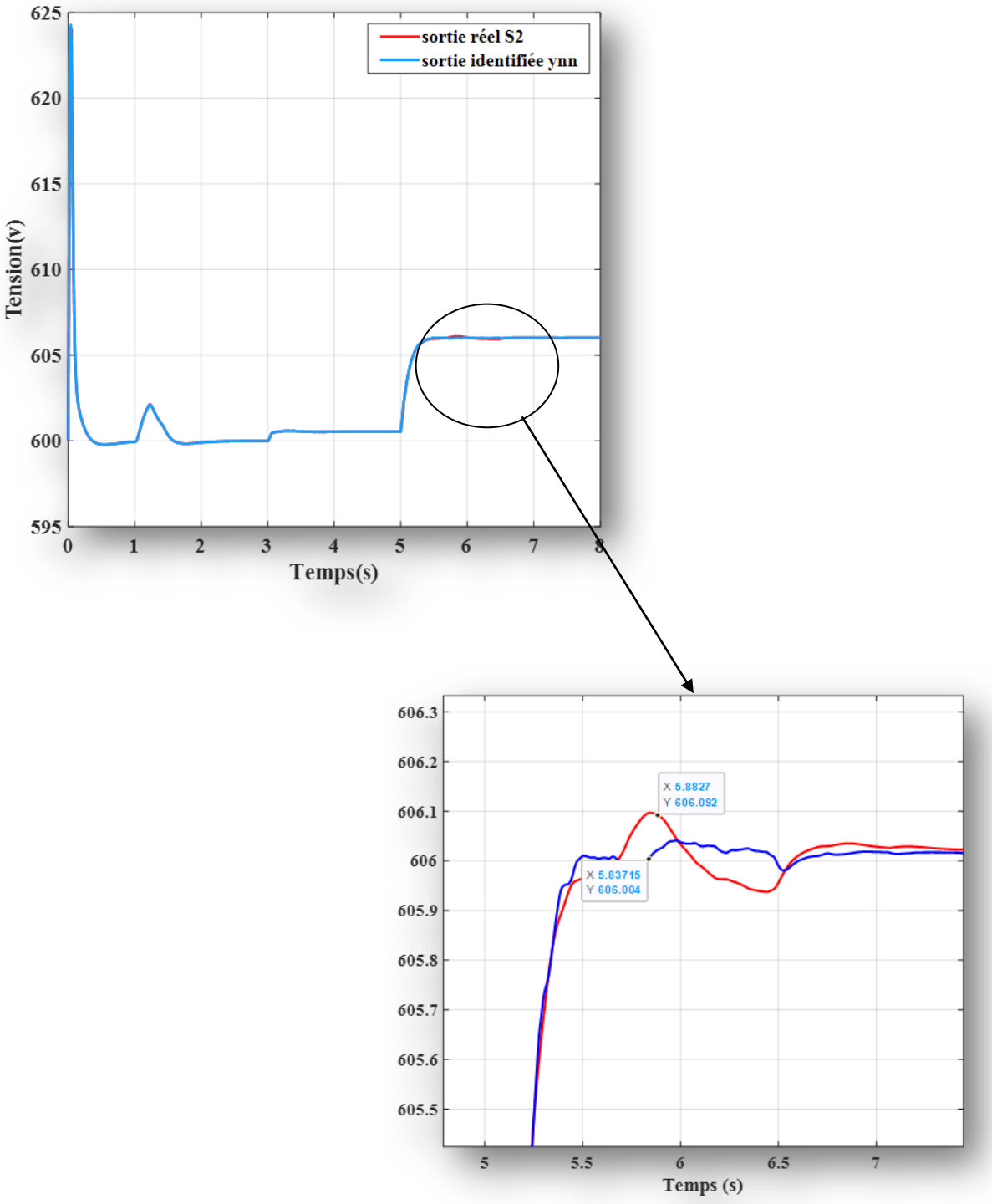


Figure IV. 22: Sortie du réseau de neurone avec trainage

Les poids entre la couche d'entrée et la couche cachée (W)		Les biais De couche cachée (bW)	Les poids entre la couche cachée et la couche de sortie (V)	Les biais de couche de sortie (bV)
5.8684	-6.5014	13.4780	2.0939	438.8084
0.0164	12.3585	-12.5480	5.1222	
0.0370	5.9110	-13.5118	2.2919	
-8.5163	-27.8901	-12.5016	-174.5076	
2.3768	-8.5240	9.7708	-18.7218	
2.3634	-6.0165	7.2642	18.9121	
-5.7540	-38.7183	31.8881	2.1691	
-5.6895	-7.3458	3.0577	0.0929	
-0.0137	-2.3958	4.0950	-7.0623	
-0.2492	-7.2649	0.9963	3.4562	

Tableau IV. 2: Les paramètre de block ANN 2

IV.6/ Applications sur micro-réseau

Dans cette section, afin de vérifier la stabilité et le comportement correct du modèle, le modèle de simulation ci-dessus décrit l'évaluation des résultats en différentes périodes :

- ✓ En 1s, la charge totale du micro-réseau passe de 450 kW/100 kvar à 650 kW/200 kvar.
- ✓ Au bout de 3 s, le contrôle du statisme est activé sur tous les onduleurs. Nous pouvons voir que la charge du micro-réseau est désormais partagée à parts égales entre les deux onduleurs.
- ✓ A 5 s, le contrôle secondaire est activé. La fréquence augmente ensuite lentement jusqu'à 50 Hz et la tension de ligne jusqu'à 600 V.

Le tableau IV.1 répertorie les valeurs des paramètres utilisés dans la simulation.

Unité	Paramètre	Valeur
Grid	**Fréquence**	**50 Hz**
Microgrid	**voltage**	**600 V**
Filtre	**Inducteur (L)**	**1 mH**
	Condensateur (C)	**60µF**
Charge 1	**P,Q**	**400KW,100KVAR**
Charge 2	**P**	**50KW**

Charge variable	P,Q	200KW,100KVAR
Temps d'échantillonnage	Ts	5e-05

Tableau IV. 3: Paramètres du modèle de simulation

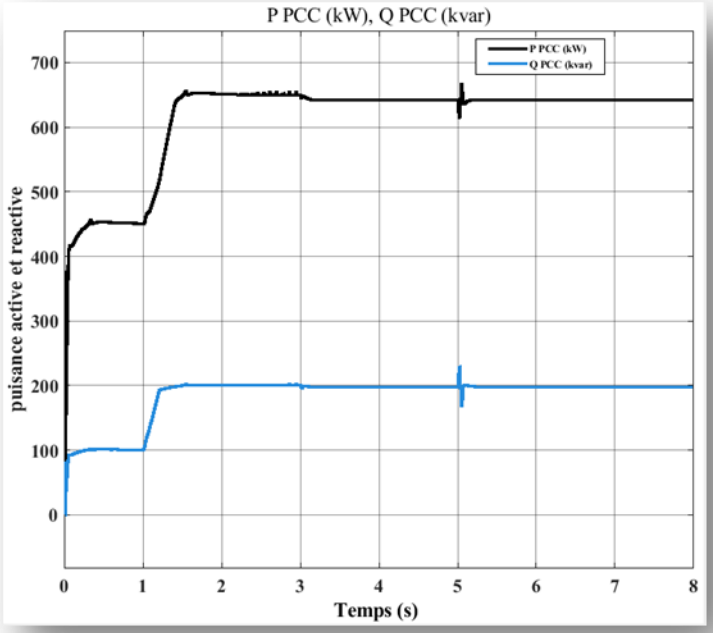


Figure IV. 23: La puissance active et réactive de PCC

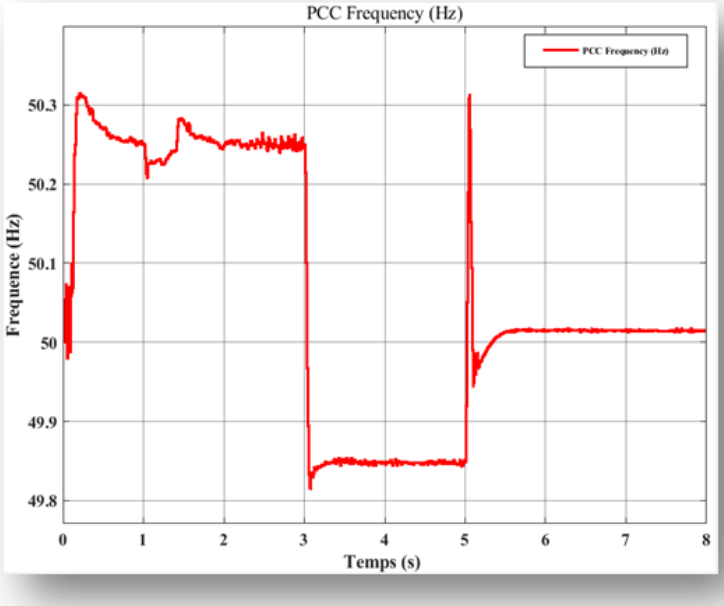


Figure IV. 24: La fréquence de PCC

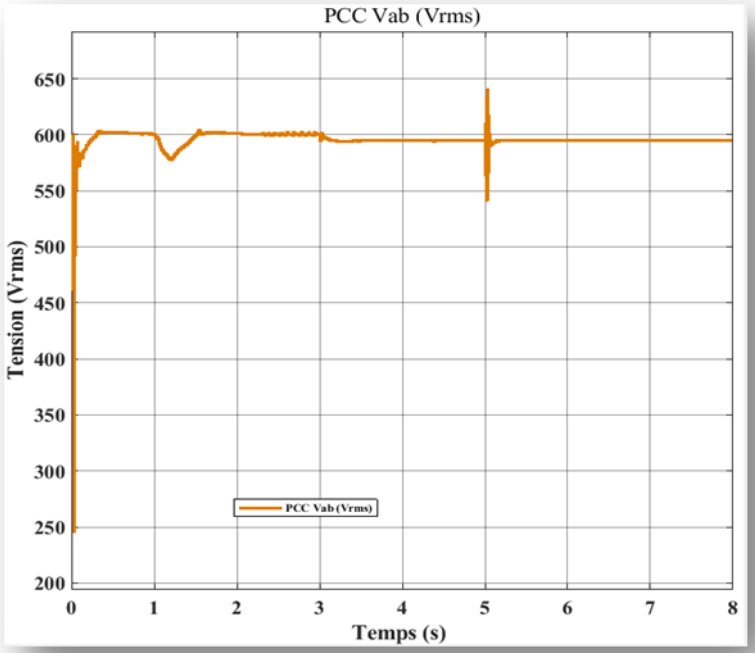


Figure IV. 25: La tension PCC

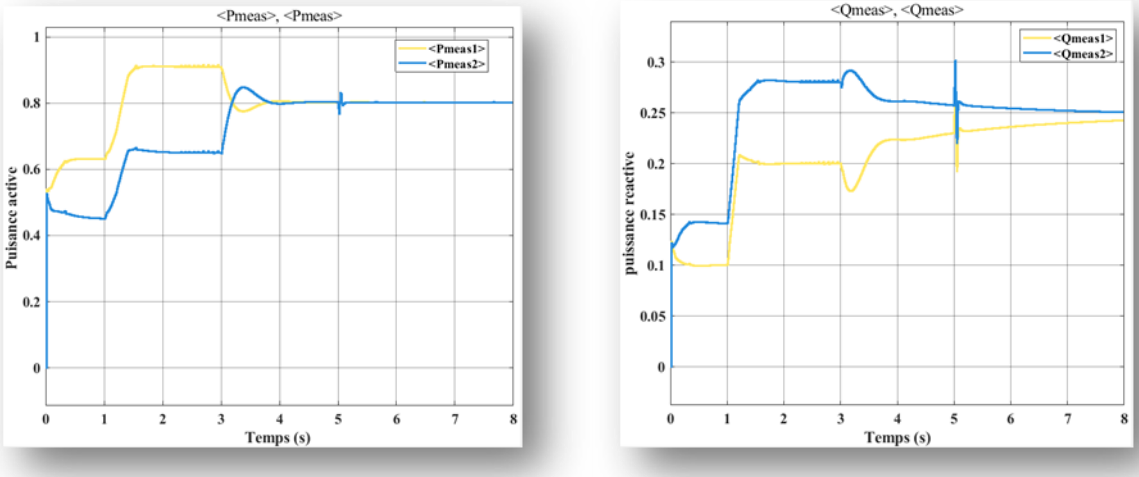


Figure IV. 26: Les puissances active et réactive générés par les deux onduleurs

- La puissance active et réactivé de P_{CC} dans le début de simulation sont 450KW et 100KVAR En 1s, on a varié la charge totale du micro-réseau jusqu'à 650 kW/200 kvar
- La courbe de fréquence P_{CC} Lorsque le contrôle de statisme est activé dans 3 secondes, sa valeur chute à 49,85 et y reste jusqu'à ce que le contrôle secondaire soit activé dans 5 secondes, donc sa valeur monte à 50 et 50,01 la valeur nominale de fréquence.

- La courbe de tension PCC dans le début de simulation est 249 Vrms, on a varié la charge totale du micro-réseau jusqu'à 600 Vrms et y reste jusqu'à la fin
- La puissance active des deux onduleurs part de 0 et monte jusqu'à 0,51 KW, on a remarqué que la puissance active du premier onduleur augmente par rapport au second jusqu'à ce qu'elles se rencontrent à 0,8 KW. Et dans la puissance réactive part de 0 et monte jusqu'à 0,13 KW. Ici, au contraire, la puissance active du deuxième onduleur augmente par rapport au premier et reste ainsi.
- Le contrôle du statisme joue un rôle crucial dans la régulation de la puissance active et réactive dans un micro réseau. Il repose sur l'idée d'une relation linéaire entre fréquence et puissance active, et entre tension et puissance réactive :
    - ✓ Si la puissance réactive augmente, la tension diminue et vice versa
    - ✓ Si la puissance active diminue, la fréquence augmente

IV.7/- Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le model de microgrid étudié avec leur structure, dans l'opération d'un micro réseau en mode îlot, En adoptant le contrôle hiérarchique (primaire et secondaire), nous avons utilisé une technologie de contrôle du statisme afin de contrôler la diminution de la puissance active et réactive pour le primaire contrôle ,et le secondaire contrôle pour assurer une stabilité de la fréquence et de la tension à long terme et pour optimiser l'efficacité opérationnelle du microgrid avec l'explication sur la façon d'implémenté les réseaux de neurones, Pour enfin obtenir les résultats souhaités

Conclusion générale

Conclusion générale

Le contrôle d'un micro-réseau est essentiel pour assurer une gestion efficace et stable de la production et de la consommation d'énergie. Les micro-réseaux intègrent diverses sources d'énergie, notamment des renouvelables comme le solaire et l'éolien, qui sont intrinsèquement variables et intermittentes. Un système de contrôle avancé permet d'équilibrer en temps réel l'offre et la demande d'énergie, de maximiser l'utilisation des sources renouvelables, de minimiser les coûts opérationnels et de garantir une alimentation électrique fiable. De plus, un bon contrôle contribue à la résilience du micro-réseau, le rendant capable de fonctionner indépendamment du réseau principal en cas de panne ou d'urgence. En somme, un contrôle efficace est crucial pour exploiter pleinement le potentiel des micro-réseaux tout en assurant leur durabilité et leur fiabilité.

Ce travail visait à explorer et évaluer l'application des réseaux de neurones pour le contrôle et l'optimisation des micro-réseaux électriques. Les micro-réseaux, en tant que systèmes énergétiques décentralisés, nécessitent des stratégies de contrôle avancées pour gérer efficacement la production et la consommation d'énergie, notamment en intégrant des sources d'énergie renouvelable et des dispositifs de stockage.

- ✓ Nous avons d'abord présenté les concepts fondamentaux des micro-réseaux, leur structure, et les défis associés à leur gestion. Ensuite, nous avons étudié les différentes méthodes de contrôle traditionnelles et avancée basées sur l'apprentissage automatique. Nous avons ensuite abordé la modélisation et le contrôle d'un microgrid Enfin, nous avons détaillé l'approche des réseaux de neurones, incluant leur architecture, leur entraînement et leur mise en œuvre pour le contrôle d'un micro-réseaux en mode isolée
- ✓ Les résultats de cette étude montrent que les réseaux de neurones offrent une performance supérieure en termes de précision et de réactivité
- ✓ Des recherches futures pourraient se concentrer sur l'amélioration des algorithmes d'entraînement des réseaux de neurones pour réduire leur complexité et leurs besoins en données. En outre, l'exploration de méthodes hybrides combinant réseaux de neurones et autres techniques d'intelligence artificielle, comme les systèmes multi-agents, pourrait offrir des solutions encore plus robustes et efficaces pour le contrôle des micro-réseaux.

En somme, l'application des réseaux de neurones au contrôle des micro-réseaux représente une avancée prometteuse dans le domaine de la gestion énergétique décentralisée. Bien que des défis subsistent, les bénéfices potentiels en termes d'efficacité, de flexibilité et de durabilité justifient pleinement les efforts de recherche et de développement dans ce domaine. L'avenir des micro-réseaux pourrait bien passer par l'intelligence artificielle, ouvrant la voie à des systèmes énergétiques plus intelligents et résilients.

Références Bibliographique

[1] : Guerassimoff, G. (2017). Microgrids: pourquoi, pour qui? (pp. 252-pages). Presses des Mines.

[2] : Tayab, U. B., Roslan, M. A. B., Hwai, L. J., & Kashif, M. (2017). A review of droop control techniques for microgrid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 717-727.

[3] : Mr. AMRIOUI Achour, Mr. HAMMACHE Mohammed. Analyse d'un micro-réseau alimenté en courant alternatif. Univ De Béjaia, 2020.

[4] : Khaleel, M. (2023). Intelligent Control Techniques for Microgrid Systems. Brilliance: Research of Artificial Intelligence, 3(1), 56-67.

[5] : Zulu, M. L. T., Carpanen, R. P., & Tiako, R. (2023). A Comprehensive Review: Study of Artificial Intelligence Optimization Technique Applications in a Hybrid Microgrid at Times of Fault Outbreaks. Energies, 16(4), 1786.

[6] : [ATTOU NASR-EDDINE. Contribution à l'étude des Réseaux Electriques Intelligents du futur (Smart-Grids). UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2022]

[7] :[BENSAOUDI, MS et ARAR, SE (2020). Etude et simulation d'un micro réseau intelligent (microgrid) (Thèse de doctorat, Directeur : Dr Bousmaha Imen Souhila/Co-directeur : M. ATTOU Nasreddine]

[8] : S. FERAHTIA, Contrôle de la mise en parallèle des batteries dans un micro réseau, Msila: Thèse de doctorat., 2018.

[9] : SEBAA, Haddi. Contribution à l'optimisation de l'insertion des énergies renouvelables dans un réseau électrique intelligent. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas - Setif1 ,2019.

[10] : Luu, N. A. (2014). Control and management strategies for a microgrid (Doctoral dissertation, Grenoble).

[11] : Morettin, L., & De Jaeger, E. Dimensionnement et protection d'un micro-réseau isolé en courant continu pour l'électrification rurale des pays en voie de développement.

[12] : Bouzid, A. E. M. (2017). Élaboration d'une méthode de contrôle pour améliorer la robustesse d'un micro réseau électrique (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).

[13] : [Zia, M. F., Elbouchikhi, E., & Benbouzid, M. (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied energy*, *222*, 1033-1055..]

[14] : [Li, S., Oshnoei, A., Blaabjerg, F., & Anvari-Moghaddam, A. (2023). Hierarchical Control for Microgrids: A Survey on Classical and Machine Learning-Based Methods. Sustainability, 15(11), 8952.]

[15] : Khefifi, N. (2021). Élaboration de stratégies de contrôle-commande basées sur la passivité pour le pilotage d'un micro-réseau de génération décentralisée de type AC en mode autonome (Doctoral dissertation, Nantes).

[16] : Roslan, M. F., Hannan, M. A., Ker, P. J., & Uddin, M. N. (2019). Microgrid control methods toward achieving sustainable energy management. Applied Energy, 240, 583-607.

[17] : Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., & Dimeas, A. (2008). Microgrids management. IEEE power and energy magazine, 6(3), 54-65.

[18] : Dou, C., Lv, M., Zhao, T., Ji, Y. et Li, H. (2015). Contrôle coordonné décentralisé du micro-réseau basé sur un système multi-agents. IET Génération, Transmission et Distribution, 9 (16), 2474-2484.

[19] : Doubabi, H. (2021). Contribution à amélioration de l'efficacité d'une chaîne de conversion photovoltaïque (Thèse de doctorat, Reims).

[20]: Albarakati, A. J., Boujoudar, Y., Azeroual, M., Eliysaouy, L., Kotb, H., Aljarbouh, A., ... & Pupkov, A. (2022). Microgrid energy management and monitoring systems: A comprehensive review. Frontiers in Energy Research, 10, 1097858.

[21] : Zhang Y, Gatsis N, Giannakis GB. Robust energy management for microgrids with high penetration renewables. Energy Pol 2005;33(6):787–98.

[22] : Reddy KS, Kumar M, Mallick TK, Sharon H, Lokeswaran S. A review of Integration, Control, Communication and Metering (ICCM) of renewable energy based smart grid. Renew Sustain Energy Rev 2014;38:180–92.

[23] : Bidram, A., & Davoudi, A. (2012). Hierarchical structure of microgrids control system. IEEE Transactions on Smart Grid, 3(4), 1963-1976.

[24] : J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, NO. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012.

[25] : Feddaoui, O., Toufouti, R., & Labed, D. (2021). Modélisation et commande d'un système d'energie hybride photovoltaïque Éolien Diesel avec batteries de stockages (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1).

[26] : Bakar, N.N.A.; Hassan, M.Y.; Sulaima, M.F.; Na'im Mohd Nasir, M.; Khamis, A. Microgrid and load shedding scheme during islanded mode: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 71, 161–169.

[27] : Boujoudar, Y.; Azeroual, M.; El Moussaoui, H.; Lamhamdi, T. Intelligent controller based energy management for stand-alone power system using artificial neural network. Int. Trans. Electr. Energy Syst. 2020, 30, e12579.

[28] : C. Stergiou and D. Siganos," Neural Networks," [online], Available

[29] : DJERIRI, Youcef. Les réseaux de neurones artificiels. Neural Network Applied To Power Quality Enhancement, 2017, 39p.

[30] : HOUSSOU, Mohammed. Optimisation De La Structure Des Réseaux De Neurones Par Algorithmes Génétiques. Mémoire de Magister, Electrique : Université De Boumerdès, 2005, 115p.

[31] : BAA, Mohammed et KHLEDJ, Omar. Reconnaissance de caractères manuscrits ou de formes par réseau de neurones. Mémoire de fin d'étude, Télécommunication : Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2017, 84p.

[32] : ABADI, Mehdi. Réalisation d'un réseau de neurones "SOM" sur une architecture matérielle adaptable et extensible à base de réseaux sur puce "NoC". Thèse de doctorat, génie électrique : Université de Lorraine ; Université du Centre (Sousse, Tunisie), 2018, 197p

[33] : Ben Cheikh Othman & Biteur Youcef. Étude et réalisation d'un système de poursuite du point de puissance maximale en utilisant les réseaux de neurones artificiels - Application au système photovoltaïque -. Mémoire de fin d'étude, Génie électrique : Universite Kasdi Merbah Ouargla, 2017, 74p.

[34] : HABIBOULLAH, Beha Dine et LADJEDEL, Billal. Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de la vitesse de vent. Mémoire de fin d'étude, Electronique : Université Mohamed Boudiaf M'SILA, 2017, 78p.

[35] Kawabata T, Higashino S. Parallel operation of voltage source inverters. IEEE Trans Ind Appl 1988;24:281–7

[36] Moslemi R, Mohammadpour J. Accurate reactive power control of autonomous microgrids using an adaptive virtual inductance loop. Electr Power Syst Res 2015;129:142–9.

Annexe

ANNEXE A : *détermination des entrées et de sortie de système avec les nombre de couche et leur fonction d'activation sans trainage*

```
clear all; close all; clc
Ts = 5e-5;
% Identification d'un système par réseau de neurones.
% Vecteur d'entrée et de sortie.
input = [E1';EN'];
output  = [S1'];
figure(1)
plot(t',E1','r','LineWidth',2),grid, %axis([0 8 -0.4 0.3])
figure(2)
plot(t',S1','r','LineWidth',2),grid, %axis([0 8 -0.4 0.3])
%Création d'un réseau de neurones de: 10 neurones dans la couche cachée
% avec une fonction d'activation 'tanh', un seul neurone dans la couche
% de sortie avec une fonction d'activation 'linéaire'.
net  = newff(minmax(input),[10 1],{'tansig','purelin'},'trainlm');
net.trainParam.lr = 0.05; % Définir le taux d'apprentissage.
net.trainParam.epochs = 1000; % Définir le nombre maximum d'itérations
net.trainParam.goal = 1e-8; % Définir le critère d'arret.
y_nn = sim(net,input);% Sortie du réseau de neurone (sans trainage)).
figure(3)
plot(t',S1','r','LineWidth',2),hold on
plot(t',y_nn,'b','LineWidth',2),grid
xlabel('x')
ylabel('y et ynn')
```

ANNEXE B : *le trainage de réseau de neurone*

```
net =  train(net,input,output);% Trainage du réseau de neurones.
y_nn = sim(net,input);% Sortie du réseau de neurone (avec trainage)).
W = net.IW{1,1}
bW = net.b{1}
V = net.LW{2,1}
bV = net.b{2}
figure(3)
plot(t',S1','r','LineWidth',2),hold on
plot(t',y_nn,'b','LineWidth',2),grid
xlabel('x')
ylabel('y et ynn')
gensim(net,Ts);
```