

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie Electrique

Spécialité : Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

THÈME

Analyse d'un micro-réseau alimenté en
courant alternatif

Devant le jury composé de :

Mme. ZIDANE. N
Mr. BOUTEBEL. M
Mr. MEJDOUBE. A

Univ. De Béjaïa
Univ. De Béjaïa
Univ. De béjaïa

Président
Encadreur
Examineur

Présenté par :

Mr. AMRIOUI Achour
Mr. HAMMACHE Mohammed

Soutenue le : 30/09/2020

2019/2020

Remerciement

Avant tout, nous remercions **Dieu** le tout puissant qui nous a
donné la force et la

Patience de faire ce travail.

Nos plus vifs remerciements vont à :

Notre promoteur M. BOUTEBEL d'avoir bien voulu diriger
ce travail,

Pour sa disponibilité, sa franchise, son aspect sérieux dans le
travail et son bagage

De connaissance qu'elle nous a fait partager.

Aux enseignants qui nous ont suivis tout au long de notre cursus
universitaire.

A tous les membres du jury pour avoir accepté de juger notre
travail.

Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la
réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédié ce modeste travail à mes parents

Qui m'ont soutenu durant ces années d'étude

A mes chers frères

A mes chères Sœurs

A toutes ma famille

A mes chers amis Namir et Antar

A mes chers amis de la résidence Berchiche 02

A mon binôme Mohammed et à toute sa famille

A tous mes collègues de la promotion

2019-2020

A tous ceux qui m'aiment et qui m'ont encouragé

Achour

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents

Qui m'ont soutenu durant ces années d'étude

A mes chers frères

A ma chère Sœurs

A toutes ma famille

A mon binôme Achour et à toute sa famille

A tous mes collègues de la promotion

2019-2020

A tous ceux qui m'aiment et qui m'ont encouragé

Mohammed

Listes de figures

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1 : Structure de base d'une unité de génération distribuée | 4 |
| Figure I.2 : Configuration typique d'un micro-réseau autonome | 8 |
| Figure I.3 : Système de micro réseau DC | 10 |
| Figures I.4 : (a) AC Micro réseau (b) DC Micro réseau | 11 |
| Figure I.5 : System d'un Micro réseau mixte AC/DC | 12 |
| Figure I.6 : Structure traditionnelle du système électrique | 14 |
| Figure I.7 : Structure du réseau intelligent | 15 |
| Figure II.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent | 17 |
| Figure II.2 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée | 19 |
| Figure II.3 : Courbe typique de production d'énergie d'une turbine éolienne | 20 |
| Figure II.4 : Eoliennes à axe vertical | 21 |
| Figure II.5 : Eoliennes à axe horizontal | 22 |
| Figure II.6 : Turbines éoliennes en amont et en aval | 23 |
| Figure II.7 : Composants d'une éolienne | 23 |
| Figure II.8 : Eléments d'une nacelle | 25 |
| Figure II.9 : les éléments d'une éolienne | 26 |
| Figure II.10 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage | 27 |
| Figure II.11 : Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique | 28 |
| Figure II.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable .. | 29 |
| Figure II.13 : Configuration du générateur diesel | 32 |
| Figure III.1 : Modèle d'un VSI contrôlé en courant | 34 |
| Figure III.2 : Modèle pour la PLL | 35 |
| Figure III.3 : contrôleur d'alimentation | 36 |
| Figure III.4 : Modèle pour le contrôleur de courant | 38 |
| Figure III.5 : modèle simplifié d'un onduleur | 39 |
| Figure III.6 : Filtre LC et charge | 41 |
| Figure IV.1 : le montage global de simulation | 43 |

| | |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Figure IV.2 : La puissance active P | 44 |
| Figure IV.3 : La puissance réactive Q | 44 |
| Figure IV.4 : courant après la capacité | 45 |
| Figure IV.5 : Avec le Zoom | 45 |
| Figure IV.6 : la tension au borne de la capacité | 45 |
| Figure IV.7 : la puissance active P | 46 |
| Figure IV.8 : la puissance réactive Q | 47 |
| Figure IV.9 : courant après la capacité | 47 |
| Figure IV.10 : Le Zoom de courant après la capacité | 47 |
| Figure IV.11 : la tension au borne de la capacité | 48 |
| Figure IV.12 : la puissance réactive Q | 49 |
| Figure IV.13 : la puissance active P | 49 |
| Figure IV.14 : le courant après la capacité | 49 |
| Figure IV.15 : Le Zoom de courant après la capacité | 50 |
| Figure IV.16 : la tension au borne de la capacité | 50 |
| Figure IV.17 : la puissance active P | 51 |
| Figure IV.18 : la puissance réactive Q | 51 |
| Figure IV.19 : courant après la capacité | 52 |
| Figure IV.20 : Le Zoom de courant après la capacité | 52 |
| Figure IV.21 : la tension au borne de la capacité | 52 |

Table des matières

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I

Généralité sur les micro-réseaux

| | |
|----------------------------------------------------------|---|
| Introduction | 3 |
| I.1 La production décentralisée | 3 |
| I.1.1 Définition de production décentralisée | 3 |
| I.1.2 Energies renouvelables | 4 |
| I.1.2.1 Eolien | 4 |
| I.1.2.2 Hydraulique | 4 |
| I.1.2.3 Géothermie..... | 5 |
| I.1.2.4 Solaire thermique | 5 |
| I.1.2.5 Biomasse et déchets | 5 |
| I.1.2.6 Marémotrice | 5 |
| I.1.2.7 Solaire photovoltaïque | 5 |
| I.1.3 Moyens de stockage..... | 5 |
| I.2 Micro-réseau | 6 |
| I.2.1 Qu'est-ce qu'un micro-réseau?..... | 6 |
| I.2.2 Les modes d'un micro réseau | 7 |
| I.2.2.1 Micro-réseau ilote | 7 |
| I.2.2.2 Micro-réseau connecté..... | 8 |
| I.2.3 Avantages et inconvénients des micro-réseaux | 8 |

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| I.2.3.1 Avantage | 8 |
| I.2.3.2 Inconvénients | 9 |
| I.2.4 Types des micro-réseaux | 9 |
| I.2.4.1 Micro-réseau DC..... | 9 |
| I.2.4.2 Micro-réseau AC..... | 10 |
| I.2.4.3 Micro-réseau AC/DC | 11 |
| I.3 Le réseaux électrique du futur : Le smart grid..... | 12 |
| I.3.1 Vers un réseau intelligent (Smart Grid)..... | 12 |
| I.4 Conclusion | 15 |

Chapitre II

Alimentation d'un micro-réseau

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| Introduction | 16 |
| II.1 Définition de l'énergie éolienne..... | 16 |
| II.2 Les caractéristiques du vent et des turbines | 17 |
| II.2.1 Principe du vent..... | 17 |
| II.2.2 la turbine éolienne | 17 |
| II.2.2.1 Puissance récupérable par une turbine | 17 |
| II.2.2.2 caractéristiques de la turbine éolienne..... | 20 |
| II.2.2.3 Types d'éolienne..... | 21 |
| II.2.2.3.1 Eoliennes à axe vertical..... | 21 |
| II.2.2.3.2 Eoliennes à axe horizontal..... | 21 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2.3 Architecture d'une éolienne..... | 23 |
| II.2.3.1 Rotor | 24 |
| II.2.3.2 Nacelle | 24 |
| II.2.3.3 Tour..... | 25 |
| II.2.4 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens | 26 |
| II.2.4.1 Systèmes non couplés au réseau alternatif | 26 |
| II.2.4.2 Systèmes couplés au réseau alternatif | 27 |
| II.2.4.2.1 Machine synchrone..... | 27 |
| II.2.4.2.2 Machine asynchrone à cage..... | 28 |
| II.2.4.2.3 Machine asynchrone à double alimentation | 29 |
| II.2.5 Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne | 29 |
| II.2.5.1 Avantage | 29 |
| II.2.5.2 Les inconvénients | 30 |
| II.2.6 Générateur diesel | 30 |
| II.3 Conclusion | 32 |

Chapitre III

Modilisation d'un micro-réseau alimenté en alternatif

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction | 33 |
| III.1 onduleur de source de tension (VSI) en mode de contrôle de courant | 34 |

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| III.2 la transformation de parck..... | 35 |
| III.2.1 la transformée directe abc-dq..... | 35 |
| III.2.2 la transformée inverse dq –abc..... | 35 |
| III.3 système de boucle à verrouillage de phase PLL | 36 |
| III.4 contrôleur de puissance | 36 |
| III.5 contrôleur de courant..... | 38 |
| III.6 Modèle de l'onduleur..... | 40 |
| III.6.1 Modèle informatisé de saturation..... | 41 |
| III.7 filtre LC et de l'impédance de couplage | 41 |
| III.8 Conclusion..... | 42 |

Chapitre IV

Simulation et analyse de cas d'étude

| | |
|-----------------------------------------------------|----|
| Introduction | 43 |
| IV.1 Simulation du système global avec MATLAB | 43 |
| IV.2 Résultats de simulation | 44 |
| IV.2.1 Sans perturbation | 44 |
| IV.2.2 la puissance active P est perturbée | 46 |
| IV.2.3 Q est perturbée | 48 |
| IV.2.4 la puissance P et Q perturbées | 51 |
| IV.3 Conclusion | 53 |

Conclusion générale 54

Références bibliographiques

Annexe

Introduction générale

Dans notre société moderne l'énergie est devenue un élément fondamental à cause de nos différentes exigences en plusieurs termes domestiques et industriels. Ce qui nous incite à réfléchir toujours à des nouvelles techniques de production de cette énergie.

Comme conséquence de la diminution des ressources énergétiques fossiles ainsi que de l'augmentation de la demande énergétique mondiale, en raison notamment de la croissance démographique et économique dans les pays en voie de développement, les préoccupations environnementales sont grandissantes. C'est pourquoi l'Homme s'intéresse aux énergies dites propres, vertes, ou moins polluantes afin principalement de lutter contre le réchauffement climatique, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de promouvoir l'efficacité énergétique. Ainsi, de nos jours, l'implantation de systèmes de production décentralisés est en plein essor, ce qui impose le développement de nouvelles approches de gestion afin, notamment, d'intégrer le caractère intermittent des différentes ressources énergétiques considérées.

La génération distribuée, ou décentralisée, d'électricité est le concept de base de différents modèles énergétiques récents, entre autres, les réseaux électriques intelligents et les micro-réseaux électriques. Ces derniers sont souvent composés de la connexion d'un ensemble de générateurs distribués pouvant opérer, soit en mode autonome, pour alimenter des charges électriques de différentes natures, soit connectés au réseau commun d'électricité, pour supporter une part des besoins en énergie électrique du réseau à travers l'injection du surplus, ou de la totalité de l'énergie produite.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'analyse d'un micro-réseau connecté au réseau. Pour se faire, nous avons décomposé ce manuscrit de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur la production décentralisée et le micro-réseau (sa définition, ses modes, ses types, et ses avantages et Inconvénients).
- Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter des généralités sur l'énergie éolienne et le moteur diesel.

- Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation du micro-réseau étudié.
- Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter les résultats de la simulation de ce micro-réseau étudié.

Chapitre I

Généralités sur les micro-réseaux électriques

I. Introduction

En raison de plusieurs problèmes que rencontrent les réseaux électriques actuels (L'augmentation de la consommation, la raréfaction du pétrole, le réchauffement climatique ainsi que la pollution environnementale, la faible efficacité énergétique, etc.), une nouvelle tendance de la production a été développée, appelée la production décentralisée. Cette production utilise des sources d'énergie renouvelable (non conventionnelle) comme le biogaz, les cellules photovoltaïques, les fermes éoliennes ... qui sont considérées comme des énergies propres, c'est à dire que l'émission de CO₂ de ces moyens de production est quasiment nulle.

Malheureusement, l'utilisation de la production décentralisée peut amener autant de problèmes qu'elle peut en résoudre. Une meilleure façon d'utiliser le potentiel énergétique de la production distribuée est d'adopter une approche permettant le contrôle local des générateurs, mais aussi des consommateurs dans un sous-réseau. Ces sous-réseaux peuvent être dénommés micro-réseau.

Fondamentalement, un micro-réseau est défini comme étant une partie d'un réseau électrique intelligent. Ce micro-réseau inclut des consommateurs, des micro-sources à base d'énergie renouvelable ainsi que des systèmes de stockage locaux. Ils peuvent être exploités en étant connectés ou sans aucun apport par d'autres réseaux.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le micro-réseau. Premièrement, nous donnerons une définition de la production décentralisée. Puis, nous détaillerons le micro-réseau et on va donner quelques aperçus générales sur les réseaux électriques intelligents.

I.1 La production décentralisée

I.1.1 Définition de la production décentralisée

La production décentralisée ou dispersée se définit par opposition à la production classique, par unités de grosses puissances raccordées au réseau HT, dont la localisation et la puissance ont fait l'objet d'une planification, et qui sont commandées de manière centralisée pour participer au contrôle de la fréquence et de la tension, et assurer un fonctionnement fiable et économique de l'ensemble du réseau. Ces unités centralisées sont dites « dispatchées ».

Par rapport aux unités classiques, les unités décentralisées sont caractérisées par des puissances ne dépassant pas 50 à 100 MW, ne sont pas planifiées de manière centralisée, ni actuellement coordonnées, elles sont généralement raccordées au réseau de distribution (<15 MW) et ne sont pas non plus actuellement destinées à assurer des services systèmes. [1]

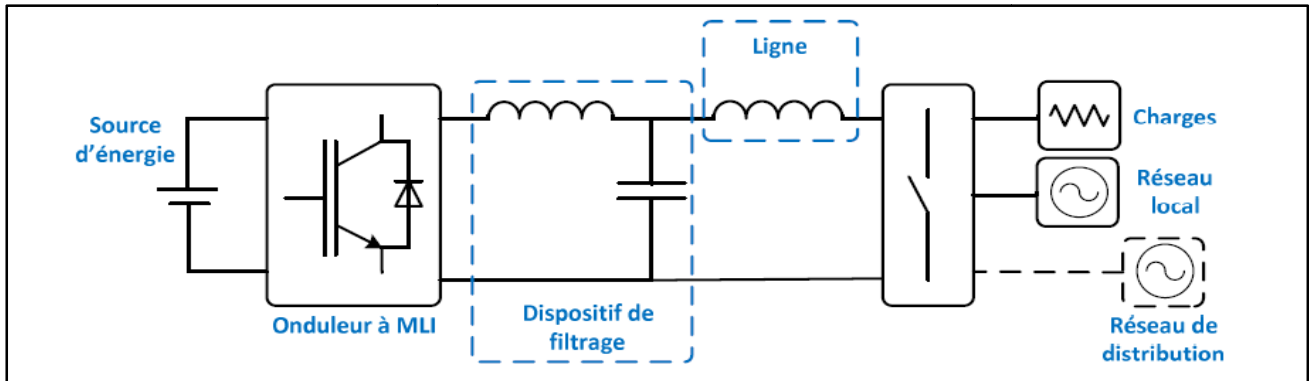


Figure I.1 : Structure de base d'une unité de génération distribuée [1]

I.1.2 Energies renouvelables

Les formes d'énergie renouvelables à finalité électrique qui sont actuellement les plus exploitées tout en respectant au mieux l'environnement sont l'hydraulique, le solaire, le photovoltaïque et l'éolien. Ces formes d'énergie sont précisées dans ce qui suit :

I.1.2.1 Eolien

Les aérogénérateurs, ou les éoliennes, tirent leur énergie du vent qui est transmise par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie, qui commence à atteindre sa maturité technologique, est de plus en plus répandue grâce à son fort attrait écologique.

I.1.2.2 Hydraulique

Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. Celle-ci est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mue par la force de l'eau qui est due soit à la hauteur de chute dans le cas de centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil de l'eau. L'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus répandue puisqu'elle est également utilisée dans la production centralisée.

I.1.2.3 Géothermie

Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350°C dans les zones les plus favorables. Cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs. La vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique.

I.1.2.4 Solaire thermique

Les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, celle-ci étant produite par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques.

I.1.2.5 Biomasse et déchets

Les déchets agricoles, urbains renouvelables, biogaz et déchets issus de l'exploitation forestière peuvent être utilisés dans des centrales thermiques pour générer de la chaleur, puis de l'énergie électrique. L'intérêt majeur est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère est compensé par celui absorbé par la repousse de la biomasse. Le bilan carbone est donc proche de zéro.

I.1.2.6 Marémotrice

Les centrales marémotrices peuvent s'apparenter à des centrales hydrauliques au fil de l'eau à ceci près que les turbines sont réversibles pour profiter du flux et du reflux des marées.

I.1.2.7 Solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Les panneaux photovoltaïques, composés de cellules photovoltaïques à base de silicium, ont la capacité de transformer l'énergie photonique en énergie électrique. Le courant continu ainsi produit est directement utilisable. [2]

1.1.3 Moyens de stockage

Avec l'avènement des sources d'énergies renouvelables, il n'est plus question de stocker ou d'emmagasiner une matière (solide, liquide ou gaz) à haut potentiel énergétique, mais plus de stocker, d'une manière ou d'une autre, l'énergie électrique qui résulte de leurs transformations.

En effet, le recours à un système de stockage reste indispensable pour accumuler l'excédent d'énergie produite afin d'en disposer ultérieurement pour compenser les écarts entre la production et la consommation.

Ces écarts sont principalement dues à la nature intermittente et imprévisible des sources d'énergie renouvelables (solaire, éolien...) et aux pics de consommation. Par ailleurs, le développement de ces sources d'énergie au sein des structures de génération distribuée d'électricité doit être accompagné par le renforcement de leurs capacités de stockage et de gestion d'énergie. Le stockage peut être réalisé par différents organes, essentiellement électrochimiques (Batterie Lithium, Accumulateurs, Super-condensateurs, Volant d'inertie, Pile à combustibles ...), avec la possibilité de les greffer aux bus DC et/ou AC.

Dans le contexte de la génération distribuée d'électricité, le stockage d'énergie doit répondre à trois enjeux principaux :

- ❖ Alimenter des sites insulaires et isolés avec une large pénétration de sources d'énergie intermittentes.
- ❖ Assurer l'autonomie des installations, la continuité de service et la sécurisation de l'approvisionnement en énergie.
- ❖ Adapter l'offre à la demande en énergie à travers un flux d'énergie bidirectionnel (charge et décharge). [1]

I.2 Micro-réseau

I.2.1 Qu'est-ce qu'un micro-réseau ?

Un micro-réseau est un réseau électrique de petite taille destiné à alimenter un petit nombre de consommateurs (quartier, zone industrielle ou artisanales, village, etc). Il est constitué de multiples charges interconnectées, des installations de production décentralisées qui sont généralement à base de ressources énergétiques renouvelables, des installations de stockage ainsi que des outils de supervision et de gestion de la demande. Il peut être raccordé au réseau principal comme il peut fonctionner seul. La capacité d'intégrer différents types de générateur et de ressources d'énergie distribuées comme l'énergie renouvelable, des systèmes de stockage et des micro-turbines améliore la fiabilité et l'efficacité de l'ensemble du système.

Le principal objectif du développement des réseaux électriques est d'atteindre l'équilibre entre la production et la consommation en intégrant des systèmes de contrôle et de stockage qui permettent de rendre le système plus stable.

De plus, les micro-réseaux sont bénéfiques pour répondre localement aux besoins électriques des clients. Ils peuvent fournir une alimentation de secours, améliorer la fiabilité locale, réduire les pertes d'alimentation et fournir un soutien à la tension locale. Du point de vue de l'environnement, les micro-réseaux permettent de réduire la pollution de l'environnement et le réchauffement climatique grâce à l'utilisation des technologies à faible émission de carbone. [4]

La particularité qui fait du micro-réseau l'une des solutions les plus étudiée dans le domaine de l'énergie est sa capacité à s'iloter du réseau principal, soit pour des raisons économiques, soit pendant un blackout ou une perturbation. De cette particularité naissent deux grandes familles de micro-réseau avec des fonctionnements et des objectifs très différents : les micro- réseaux connectés et les micro- réseaux ilotes. [3]

I.2.2 Les modes d'un micro-réseau

I.2.2.1 Micro-réseau ilote

Les micro-réseaux ilotes, comme leur nom l'indique, ne sont pas connectés à un réseau électrique fort. Ce mode de fonctionnement peut être temporaire, lorsque le micro réseau s'est volontairement déconnecté du réseau principal, où permanent. [3]

Le micro-réseau constituera une structure autonome permettant un flux de puissances entre ses différents éléments (voir la figure I.2).

L'autonomie de ces architectures fait référence aux types de génération non raccordées au réseau électrique commun, mais aussi à leur capacité en puissance et à la gestion décentralisée qu'elles offrent. Cette autonomie réfère aussi au rapprochement que permettent ces structures entre la production et la consommation, ou en effet, un nouvel acteur est considéré, à savoir le consommateur/producteur. La Figure I.2 met en avant la configuration typique d'un micro-réseau autonome. Cette structure offre la possibilité d'opérer en îlot isolé ou connecté au réseau commun. Sa construction varie en fonction des besoins et des contraintes liées à l'application, néanmoins, les éléments suivants y sont souvent observés :

- ❖ Les sources d'énergie, entre autres, les systèmes de stockage, les générateurs diesels, et les sources d'Energie Renouvelables.
- ❖ Les convertisseurs de puissance (essentiellement les onduleurs sources de tension).
- ❖ Les dispositifs de filtrage, lignes d'interconnexion et étages de transformation.
- ❖ Les charges électriques. [1]

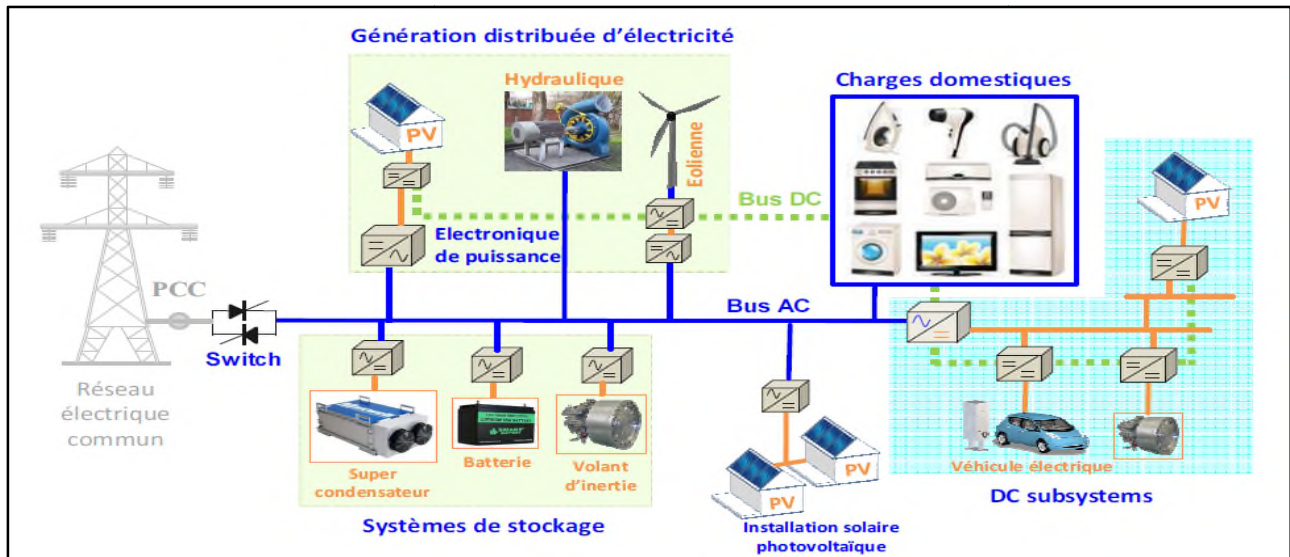


Figure I.2 : Configuration typique d'un micro-réseau autonome [1]

I.2.2.3 Micro-réseau connecté

Une (ou plusieurs) connexion(s) avec le réseau principal appelée PPC (Point of Common Coupling = Point de Couplage Commun) avec un commutateur permettant la connexion/déconnexion. [3]

I.2.3 Avantages et inconvénients des micro-réseaux

Parmi les avantages et inconvénients que nous pouvons rencontrer, nous avons :

I.2.3.1 Avantage

1. Isolation de toute perturbation ou panne du réseau électrique.
2. Amélioration de l'efficacité énergétique.
3. Réduction des émissions de gaz qui peut aider à lutter contre le réchauffement climatique.
4. Réduction de la distance physique et électrique entre les micro-sources et les charges ce qui contribue à la réduction des pertes.
5. Atteindre l'équilibre offre-demande.
6. Amélioration de la puissance et de la fiabilité.
7. Faire face à la pollution environnementale.

I.2.3.2 Inconvénients

1. Coûts élevés des installations ainsi que des ressources énergétiques décentralisées.
2. Difficultés techniques liés au manque d'expérience technique.
3. Absence de normes : puisque c'est un domaine relativement nouveau, les normes ne sont pas encore disponibles pour résoudre les problèmes de fonctionnement et de protection.
4. Absence de lois ou règlement standard pour réguler le fonctionnement des micro-réseaux. [4]

I.2.4 Architecture fonctionnelle des micro-réseaux

Il y'a trois principales architectures de micro-réseaux, classifiées suivant le principal mode de distribution de l'énergie électrique:

- les micro-réseaux de type AC; où l'interconnexion se fait en courant alternatif
- les micro-réseaux de type DC; où l'interconnexion se fait en courant continu
- les micro-réseaux hybrides possédant des sections AC et des sections DC.

Dans tous les cas, l'interconnexion entre le micro-réseau et tout système adjacent (réseau national où autres micro-réseaux) se fait en courant alternatif, suivant les normes fixées par le détenteur de ce grand réseau.

I.2.4.1 Les micro-réseaux de type AC (Courant Alternatif)

Ces architectures tirent avantage de l'infrastructure déjà existante (disjoncteurs, transformateurs, génératrices synchrones, etc.) des réseaux AC classiques. Ainsi, les sources traditionnelles telles que le diesel et l'hydroélectrique sont directement connectées au bus principal de transfert d'énergie et constituent la base du micro-réseau. Les sources renouvelables sont intégrées graduellement pour réduire la part des sources les plus polluantes et nécessitent en général des convertisseurs de puissance.

Dans le cas particulier du photovoltaïque, la source renouvelable produit une puissance (tension et courant) continue qui est traitée par des dispositifs d'électronique de puissance (hacheurs et onduleurs), de manière à produire des tensions et courants alternatifs stables et synchronisés avec la base du micro-réseau. Il en est de même de l'éolien où les générateurs sont dans la plupart des cas des génératrices synchrones ou asynchrones qui nécessitent des chaînes de conversion AC-DC-AC pour délivrer l'énergie aux normes requises. Cependant, certaines conceptions de convertisseurs éoliens à génératrices asynchrones auto-excitées permettent de réduire les coûts de l'installation. Ceci se fait en

général au détriment de la flexibilité du système. Pareillement, aux sources renouvelables les systèmes de stockage nécessitent aussi des convertisseurs de puissance. Les charges locales sont compatibles avec le bus principal et les structures de connexion traditionnelles sont maintenues. Il en est de même pour le raccordement au réseau principal qui s'opère à l'aide des disjoncteurs et des commutateurs électromécaniques, qui sont commandés par le système de gestion du micro-réseau.

Un exemple d'architecture de micro-réseau AC est donné à la Figure I.3. Chaque micro-source possède un contrôleur (CMS) qui assure le fonctionnement optimal de l'équipement, effectue des mesures automatisées et interprète les consignes émises par le contrôleur général du micro-réseau (CGM). Les dispositifs de stockage possèdent des structures similaires et sont gérés par des contrôleurs de système de stockage (CSS). Au niveau des charges, des systèmes automatisés de mesure (SAM) permettent de mesurer la consommation à tout instant tout en renseignant le CGM sur l'état du réseau. Enfin, le CGM centralise les données du micro-réseau et gère les échanges d'informations et d'énergie avec un système plus global (Réseau d'énergie national, internet).

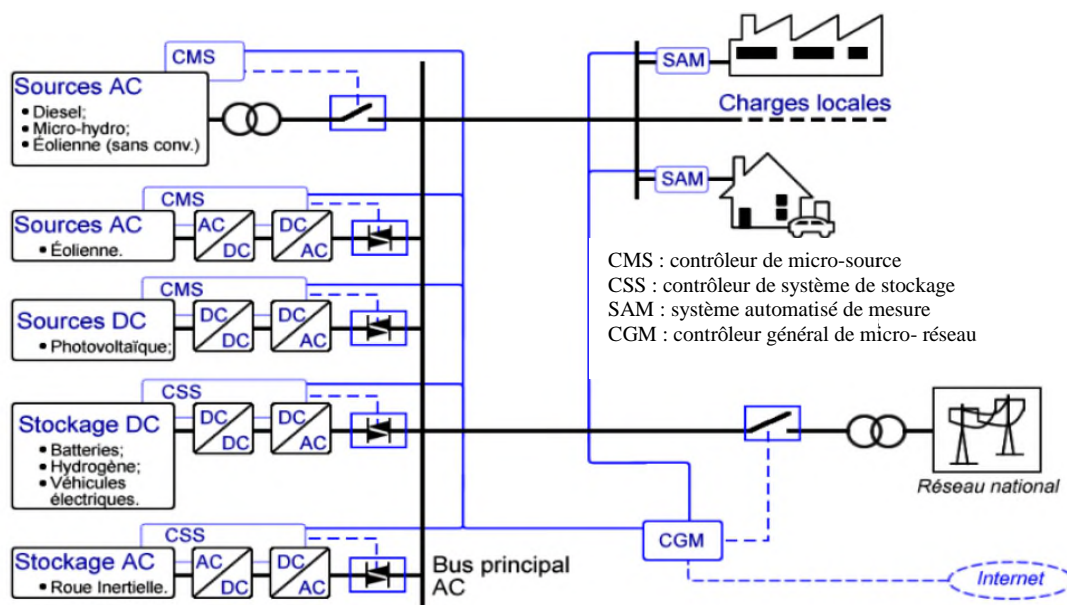


Figure I.3 : Architecture type d'un micro-réseau AC [5]

I.2.4.2 Les micro-réseaux de type DC (Courant Continu)

Compte tenu de la multitude d'onduleurs requis pour adapter les nouvelles technologies de production et de stockage au bus principal des micro-réseaux AC, l'objectif principal des micro-réseaux DC est de réduire les coûts et les pertes en supprimant les interfaces AC (Onduleurs et filtrages AC). Par ailleurs, ces structures éliminent la nécessité de synchroniser les différentes sources et permettent une meilleure intégration des sources renouvelables. L'énergie est transférée à travers le micro-réseau à l'aide d'un bus courant continu. Les charges traditionnelles AC (les

machines électriques par exemples) nécessitent des onduleurs pour adapter leurs alimentations. Il en est de même pour la connexion au réseau national qui doit se faire au travers d'un onduleur de grande puissance. Un redresseur à thyristors fonctionnant en onduleur assisté peut être utilisé à cet effet.

Le micro-réseau DC typique est schématisé à la Figure I.4. Même s'ils manipulent des données différentes par rapport aux architectures AC, on retrouve des organes de contrôle pour chaque source, système de stockage et charge. "L'intelligence" est construite via un réseau de transport de données qui peut être de même nature que pour les micro-réseaux AC. Le transfert d'énergie se fait via deux principaux fils (le positif et le négatif) du bus DC principal. Les lois physiques qui s'appliquent à ce niveau sont simples et datent de l'invention même du réseau électrique. Le système de téléphonie terrestre permet de se faire une bonne idée de ce que pourrait être cette architecture. Les micro-réseaux DC et les convertisseurs de puissance en général ont connu un essor fulgurant grâce aux développements en électronique industrielle et systèmes informatiques embarqués. Cependant, la nécessité de reconstruction de l'infrastructure de transport et la redéfinition des normes sont des tâches ardues qui freinent le développement de ces architectures.

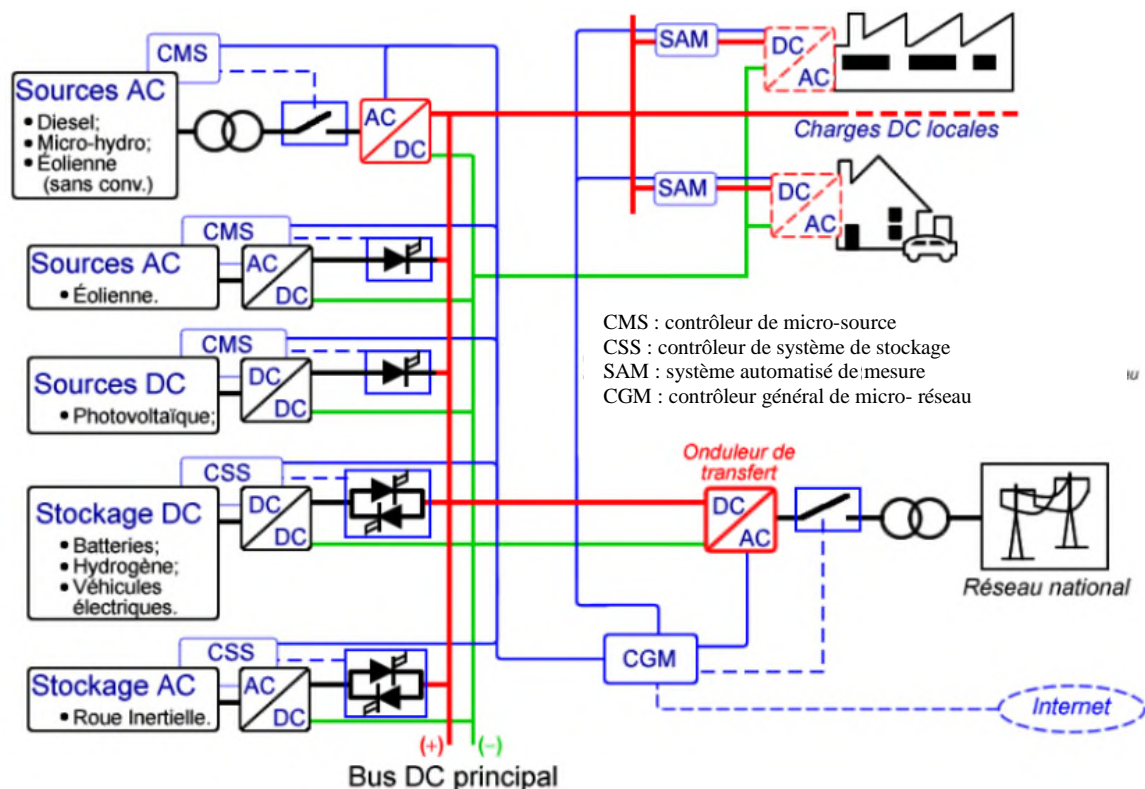


Figure I.4 : Architecture type d'un micro-réseau DC [5]

I.2.4.3 Les micro-réseaux hybrides (AC/DC)

L'architecture hybride permet de tirer le meilleur des architectures AC et DC. En général, des sous-sections entièrement DC sont aménagées dans un micro-réseau AC pour agréger au mieux les ressources (production et stockage) de type DC. Ainsi, on évite l'emploi d'onduleurs centraux de grandes puissances dont le dysfonctionnement peut paralyser le réseau tout entier. À la place, on dispose d'une multitude d'onduleurs de moindre capacité servant de concentrateurs. Ces derniers peuvent être gérés par des contrôleurs de section DC (CSDC). La section principale étant de type AC, elle permet une connexion simple aux sources traditionnelles, aux réseaux adjacents et aux charges industrielles locales.

On peut aussi imaginer un micro-réseau DC possédant des sous-sections AC, cependant cette solution s'avère moins économique. Il est aussi à noter que toute section DC possédant un CSDC, au moins une source et un système de stockage est assimilable à un micro-réseau DC fonctionnant en cogénération avec le micro-réseau AC principal. Ainsi, une architecture hybride peut être conçue comme un agrégat constitué de micro-réseaux de différentes natures. [5]

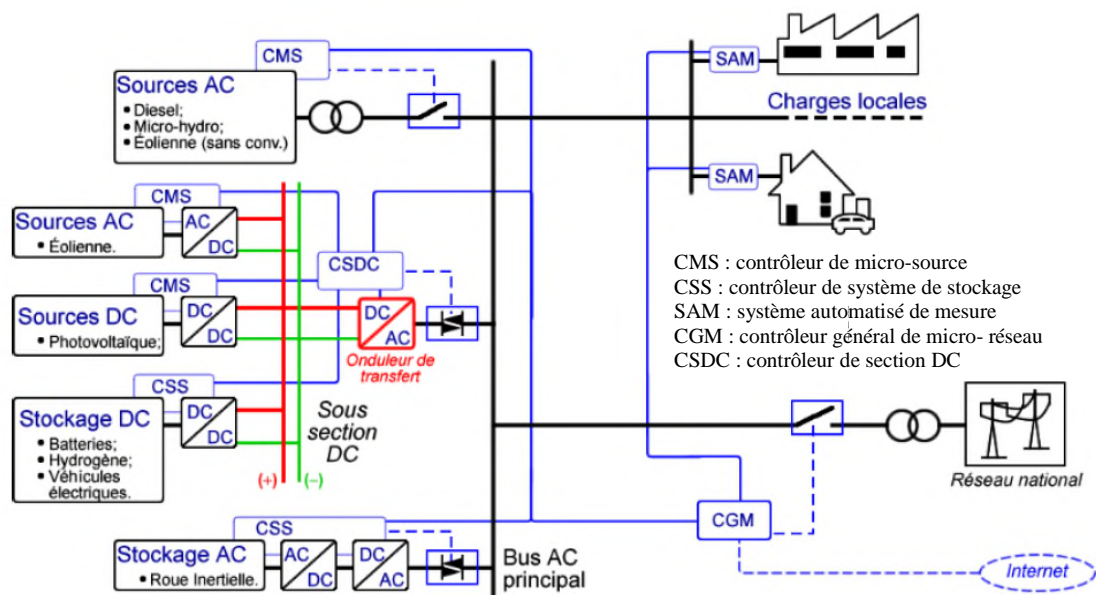


Figure I.5 : Architecture hybride (AC possédant une sous-section DC) [5]

I.3 Le réseau électrique du futur : Le réseau électrique intelligent

Face à la croissance de la consommation et au développement massif de la production décentralisée, on attend des réseaux électriques du futur les qualités suivantes :

1. La flexibilité : le réseau doit répondre aux besoins de tous les clients en prenant en considération les évolutions à venir.

2. L'accessibilité : le réseau doit pouvoir accueillir tous les utilisateurs (producteurs centralisés et décentralisés, consommateurs) et permettre une production locale à haute efficacité énergétique.
3. La fiabilité : le réseau doit assurer et améliorer la sécurité ainsi que la qualité de la fourniture de l'énergie électrique.
4. L'économie : le réseau doit garantir des coûts optimisés par l'innovation, la gestion efficace de l'énergie, la libre concurrence et la soumission à une même réglementation pour tous les utilisateurs. [6]

I.3.1 Vers un réseau intelligent

Le terme « réseau intelligent » (une autre appellation populaire est le terme anglais « Smart Grid ») est un réseau de distribution d'électricité qui utilise des technologies informatiques de manière à optimiser et coordonner la production, la distribution et la consommation d'électricité afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité de ce système. Les nouvelles technologies permettront de faire des économies en lissant les pointes de consommation en utilisant la production décentralisée et ainsi de diminuer les appels aux capacités qui sont coûteuses et plus polluantes. De cette manière l'alimentation des consommateurs sera plus fiable et le coût de l'énergie électrique pourrait être réduit. Le déploiement des réseaux intelligents sera aussi un des catalyseurs de l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique.

Dans un système électrique, la génération est à chaque instant liée à la demande des utilisateurs. Sachant que la demande est variable et ne peut pas être maîtrisée, sauf dans les cas particuliers (par exemple par le contrôle direct de charge, l'effacement, le délestage, ...), la production doit s'adapter instantanément à la demande pour préserver la stabilité du système. Les réseaux intelligents permettront d'agir sur la demande à travers des compteurs intelligents, capables de déplacer certaines charges dans le temps à l'arrivée d'un signal tarifaire. Cette interaction entre producteurs, distributeurs et consommateurs, par l'intermédiaire d'un réseau informatique et des agrégateurs locaux, permettra d'atteindre une meilleure adaptation de la consommation aux capacités instantanées de production que l'utilisation du stockage décentralisé.

Une récapitulation des différences entre le système électrique traditionnel et le réseau intelligent est illustrée sur les (figures I.6 et figure I. 7)

Dans le système électrique actuel (figure I.6), la génération d'électricité est effectuée plutôt dans des grandes centrales électriques. Ces centrales sont supervisées et pilotées par le centre de dispatching du réseau de transport. L'opérateur du réseau de transport reçoit des informations pour la

consommation depuis les postes de transformation et les opérateurs des réseaux de distribution. La génération décentralisée est perçue par les opérateurs des réseaux comme une charge passive (non contrôlable, subie) de puissance négative, elle n'est pas pilotée et la puissance générée est estimée uniquement sur la base des prévisions. Une fois que la génération distribuée dépasse en termes de puissance la consommation sur une branche du réseau, cela peut provoquer des difficultés au niveau local à tous les autres niveaux du système électrique. [7]

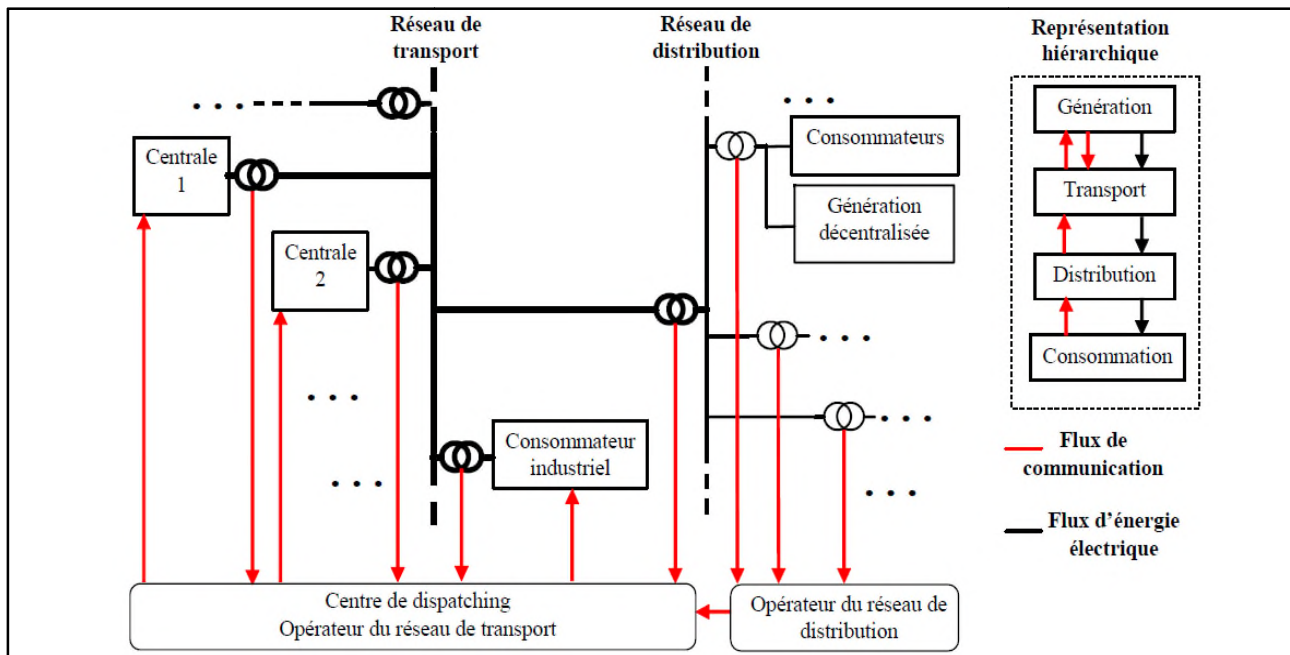


Figure I.6 : Structure traditionnelle du système électrique [7]

Par contre, dans le concept du réseau intelligent (figure I.7), la production décentralisée et la consommation sont pilotées localement d'une manière optimale, par des contrôleurs centraux et, de cette manière, chaque ensemble local de générateurs décentralisés, charges et dispositifs de stockage paraît pour l'opérateur du réseau de distribution comme une seule entité qui peut se comporter soit comme un consommateur, soit comme un producteur d'énergie électrique. De cette façon il est plus facile de prévoir la consommation et la production avec un horizon petit et ainsi les informations que les autres acteurs du système électrique reçoivent seraient plus ce qui permet d'optimiser l'ensemble du système électrique. [7]

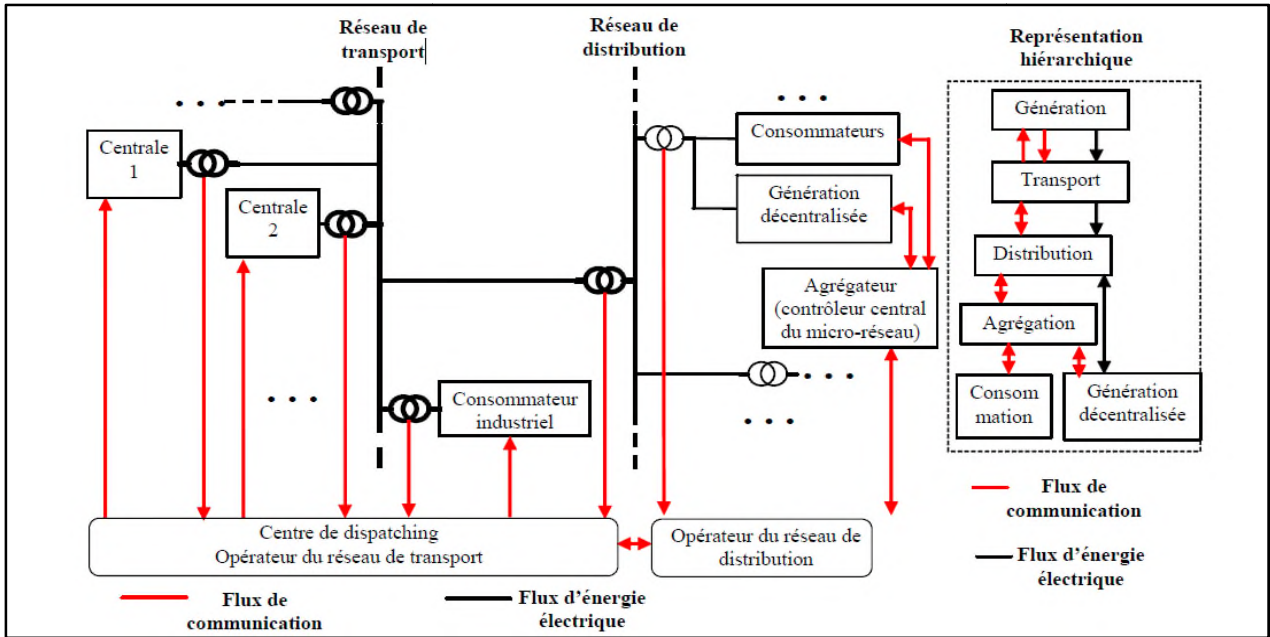


Figure I.7 : Structure du réseau intelligent [7]

I.4 Conclusion

Dans le premier chapitre, Nous avons traité les différents types de la production décentralisées, le micro-réseau sa définition et ses différents types, Ainsi, ses avantages et inconvénients. En fin nous avons parlé sur le micro-réseau intelligent.

Chapitre II

Alimentation d'un micro-réseau

Introduction

L'énergie éolienne est l'une des sources renouvelable tirée directement du vent à travers un dispositif appelé éolienne. La production d'électricité par les éoliennes a adopté un développement significatif dans le monde. Dans ce chapitre on va parler sur l'aspect technologique de la turbine éolienne et ces différents types, Ainsi, le générateur diesel.

II.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières:

- ❖ Soit Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- ❖ Soit Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

[8]

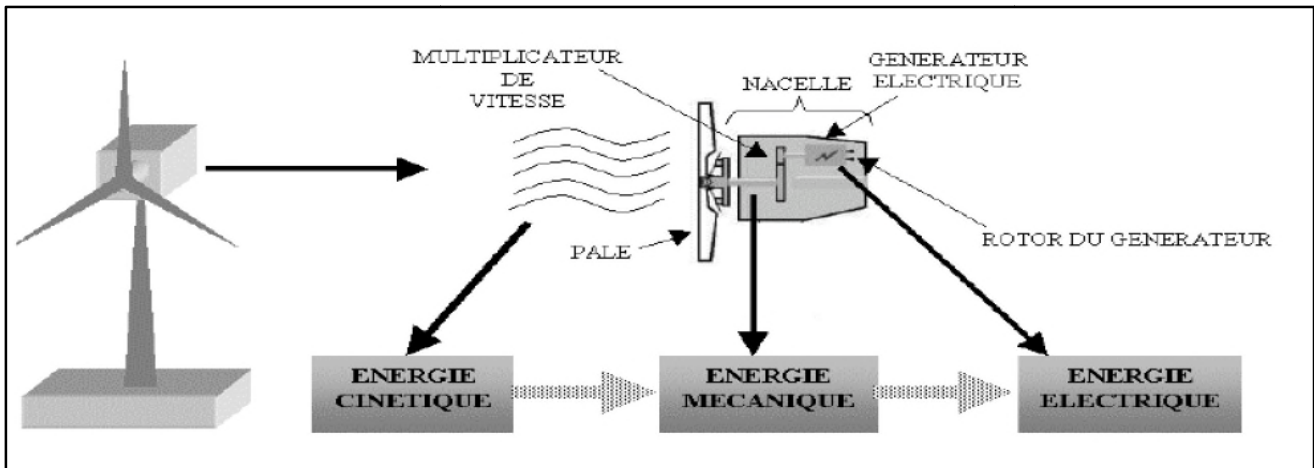


Figure II.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [8]

II.2 Les caractéristiques du vent et des turbines

II.2.1 Principe du vent

Le vent, c'est de l'air qui se déplace à cause des différences de température et de pression dans l'atmosphère. En effet, L'air chaud est plus léger que l'air froid. C'est pourquoi, quand le Soleil chauffe la mer ou le sol, L'air qui se trouve juste au-dessus se réchauffe, s'allège, et monte, en poussant l'air froid qui est plus haut. L'air froid, plus lourd, descend et vient remplacer l'air chaud, puis il se réchauffe à son tour, et ainsi de suite.

En plus, comme la Terre est ronde, le Soleil ne distribue pas la chaleur partout de façon égale, et celle-ci n'est pas absorbée de la même manière par la mer ou par le sol. Toutes ces différences font que les masses d'air se déplacent verticalement et horizontalement.

Il existe des sites plus ou moins venteux, selon leur emplacement et leur dégagement, mais aussi selon leur incidence sur la pression de l'air. Par exemple, les crêtes de montagne et le bord de mer connaissent des vents plutôt violents : dans ces endroits, il y a en effet peu d'obstacles naturels ou de bâtiments pour retenir le vent. [9]

II.2.2 la turbine éolienne

II.2.2.1 Puissance récupérable par une turbine

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{II.1})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface A , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (\text{II.2})$$

Où ρ est la masse volumique de l'air.

Ce pendant, le dispositif de conversion extrait une puissance P_e inférieure à la puissance incidente P_v , à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation :

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} ; \quad C_p < 1 \quad (\text{II.3})$$

Ce coefficient caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter de l'énergie éolienne.

La puissance correspondante est donc donnée par :

$$p_e = \frac{1}{2} \rho \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_p \quad (\text{II.4})$$

Où R est le rayon de l'hélice.

On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, en s'appuyant sur la théorie Rankine – Froude de l'hélice dans un fluide incompressible. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée la limite de Betz (théorie de Betz années 1920) du coefficient de puissance.

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (\text{II.5})$$

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (\text{II.7})$$

Où $R\Omega$ est la vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice.

La courbe $C_p(\lambda)$ passe un maximum λ_{\max} , compris entre 5 et 16 environ, selon le nombre de pales de la turbine et c'est seulement pour cette valeur que C_p approche la valeur de $16/27$.

On peut définir la notion de rendement aérodynamique de l'éolienne par le rapport :

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_p^{\max}} = \frac{C_p}{0,593} \quad (\text{II.8})$$

qui est représentatif de la « qualité aérodynamique » de l'éolienne. La figure II.2 montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal à 1, 2, 3 et 4 pales, notons que sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0,59). Ces courbes dépendent pratiquement du profil des pales.

Si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour $\lambda \approx 7$, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique. A diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale.

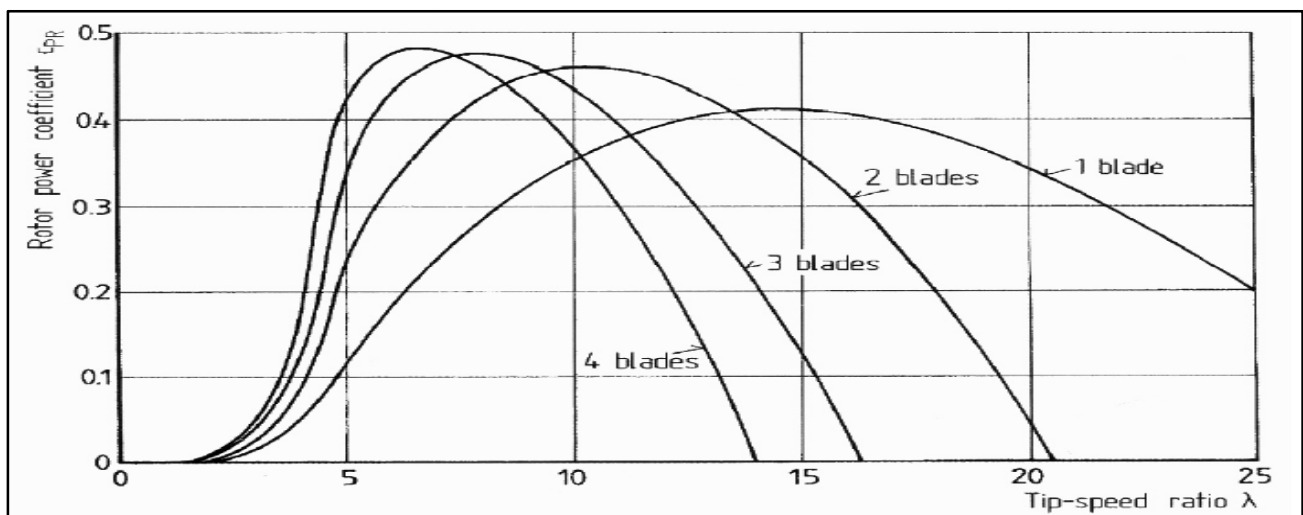


Figure II.2 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée [10]

Un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, permet de rester sur le maximum de la courbe.

Pratiquement la puissance récupérable ne dépasse pas 60 à 70% de la valeur de maximale (0,59) à cause des divers rendements successifs de la chaîne de conversion.

Si on fait le calcul avec une masse volumique de l'air égale à $1,2 \text{ kg/m}^3$, on obtient, pour une vitesse moyenne de vent de 6 m/s , une puissance par unité de surface balayée de 77 W/m^2 , soit une énergie annuelle de 670 kW.h/m^2 .

La productivité moyenne des aérogénérateurs danois valait environ 500 kW.h/m^2 au début des années 80 et atteint 900 kW.h/m^2 à la fin des années 90. [10]

II.2.2.2 caractéristiques de la turbine éolienne

La courbe de production d'énergie d'un système de conversion d'énergie éolienne peut être divisée en quatre domaines (figure II.3) :

- ❖ **Zone I** : La turbine ne tourne pas et le convertisseur est isolé.
- ❖ **Zone II** : La turbine peut seulement fonctionner à λ_{opt} dans cette zone. Un contrôleur est nécessaire dans la présente partie.
- ❖ **Zone III** : La production d'énergie de la turbine doit être limitée parce que le générateur est déjà à sa puissance maximale.
- ❖ **Zone IV** : la turbine est arrêtée pour éviter des dommages aux vitesses de fort vent.

La conversion d'énergie doit être maximisée dans la zone II. En fait, deux contrôleurs différents sont demandés. Un pour la zone II, maximisation de la production d'énergie, et une pour la zone III, maintient la puissance produite constante à la puissance nominale. [11]

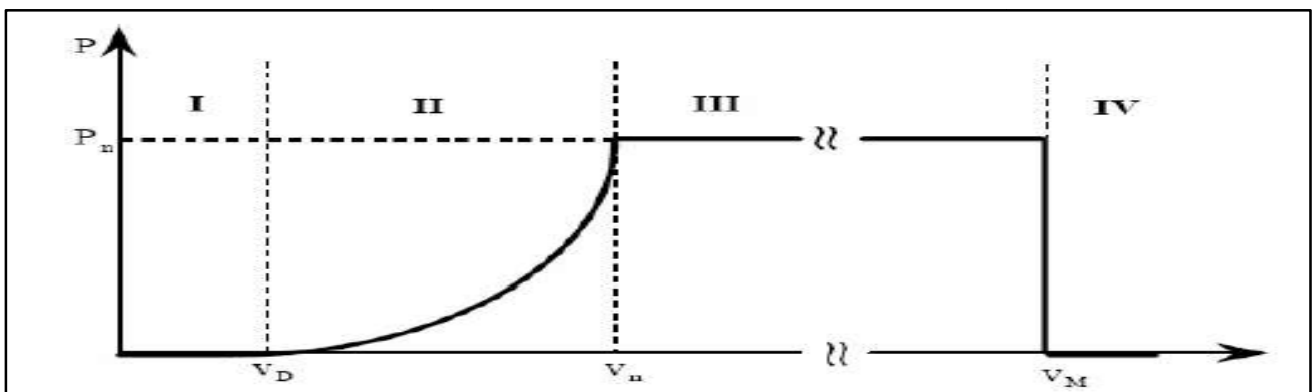


Figure II.3 : Courbe typique de production d'énergie d'une turbine éolienne [11]

II.2.2.3 Types d'éolienne

Les éoliennes sont classées suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

II.2.2.3.1 Eoliennes à axe vertical

L'axe de rotation de ce type d'aérogénérateur est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et le multiplicateur sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée du fait qu'elle se fait au sol.

La majorité des éoliennes à axe vertical tourne à faible vitesse, ce qui est très pénalisant dans les applications de génération d'électricité avec connexion au réseau car la boîte de vitesse doit permettre une importante démultiplication. Le faible rendement et la quantité de vent réduite qu'elles reçoivent au niveau du sol, constituent les principaux inconvénients de ce type d'éolienne. La figure II.4 montre un exemple d'éoliennes à axe vertical.



Figure II.4 : Eoliennes à axe vertical [12]

II.2.2.3.2 Eoliennes à axe horizontal

Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité

plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal. Ce choix présente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage (démarrage). Toutefois, la boîte de vitesses et la machine électrique doivent être installées en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. Selon son nombre de pales, l'éolienne à axe horizontal est dite mono-pale, bipales, tripales ou multi-pales.

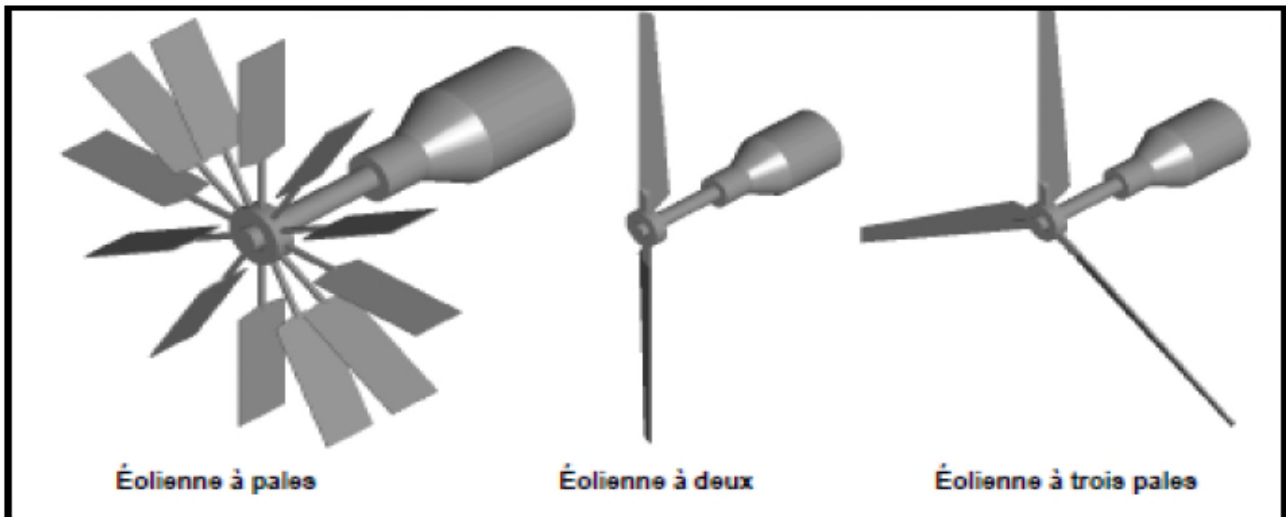


Figure II.5 : Éoliennes à axe horizontal [12]

Une éolienne mono-pale est moins coûteuse car les matériaux sont en moindre quantité. Cependant, un contre poids est nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très utilisé à cause de cela.

Les rotors bipales doivent être munis d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour.

Alors, pour remédier à ces problèmes, pratiquement toutes les éoliennes installées ou prochainement installées sont de type tripales. Celles-ci sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

- a) **Amont** : Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- b) **Aval** : Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

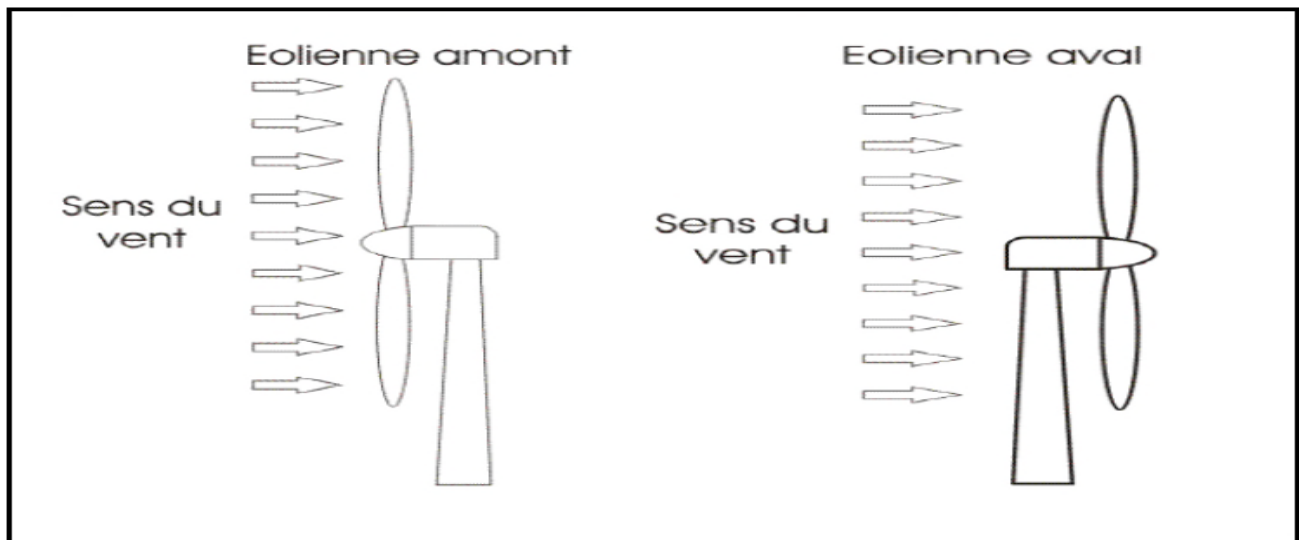


Figure II.6 : Turbines éoliennes en amont et en aval [12]

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. La disposition de la turbine en amont est la plus utilisée à cause de sa simplicité, et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances sachant que les efforts de manœuvre sont moins importants et donne une meilleure stabilité. [12]

II.2.3 Architecture d'une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, (Voir Figure II.7)

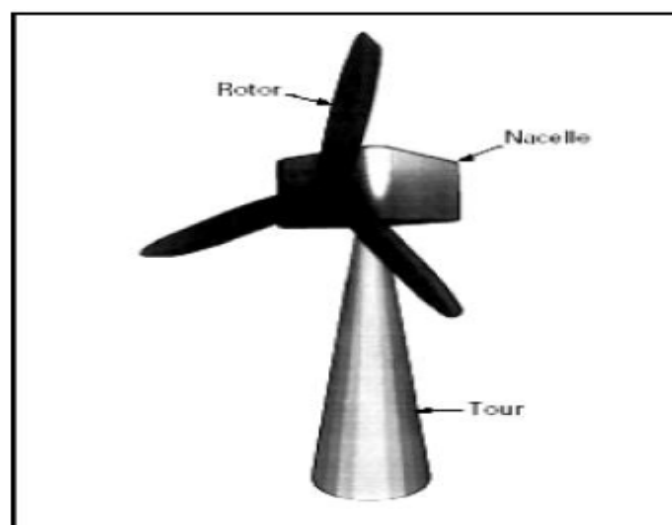


Figure II.7 : Composants d'une éolienne [8]

II.2.3.1 Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor...)

II.2.3.2 Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure II.8 présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants:

- ❖ Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- ❖ L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ❖ Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- ❖ Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- ❖ Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.

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

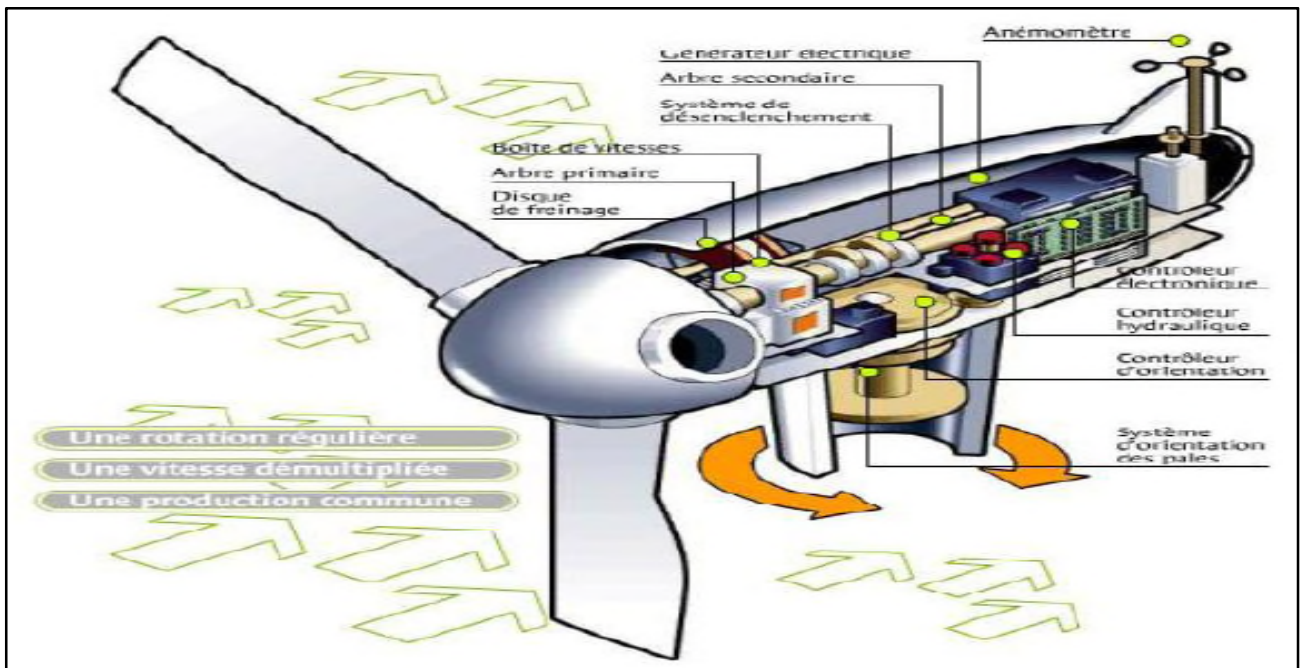


Figure II.8 : Eléments d'une nacelle [8]

II.2.3.3 Tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) (Voir Figure II.9), de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation. [8]

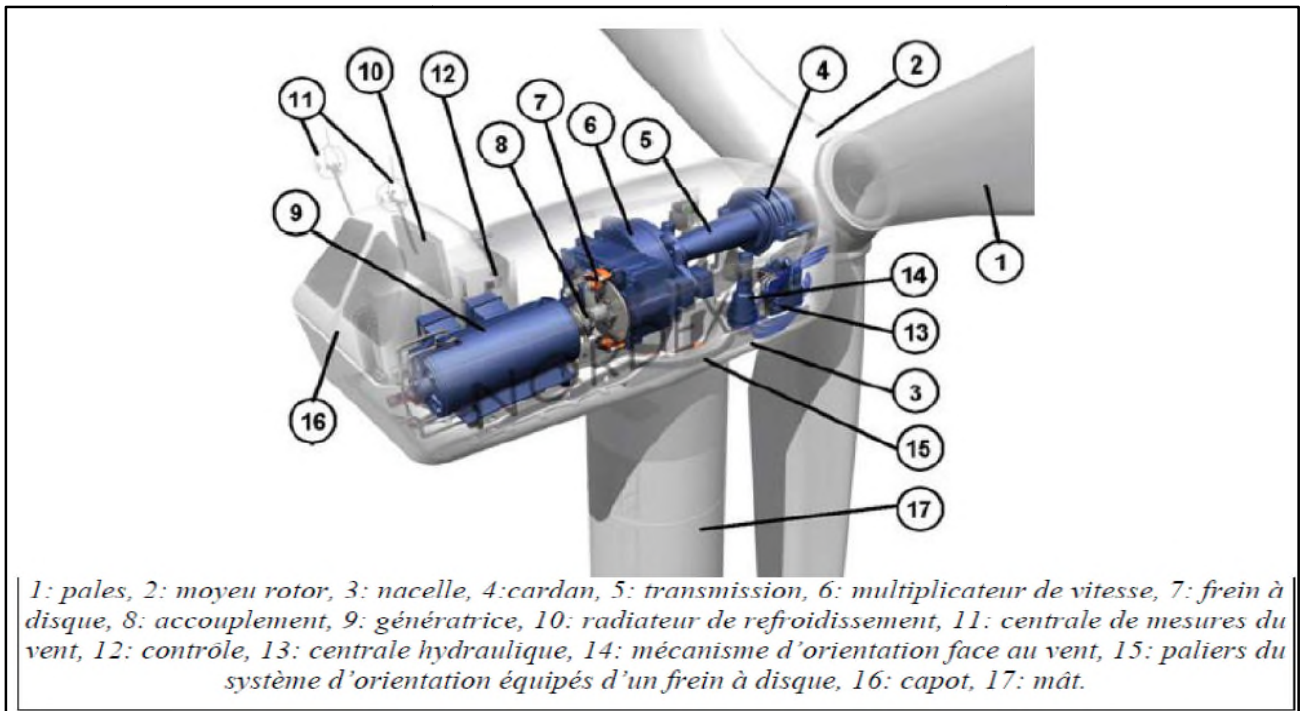


Figure II.9 : les éléments d'une éolienne [8]

II.2.4 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- ❖ Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge
- ❖ L'implantation sur terre ferme ou en mer

Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

II.2.4.1 Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent de diesel.

Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto amorcée par condensateurs.

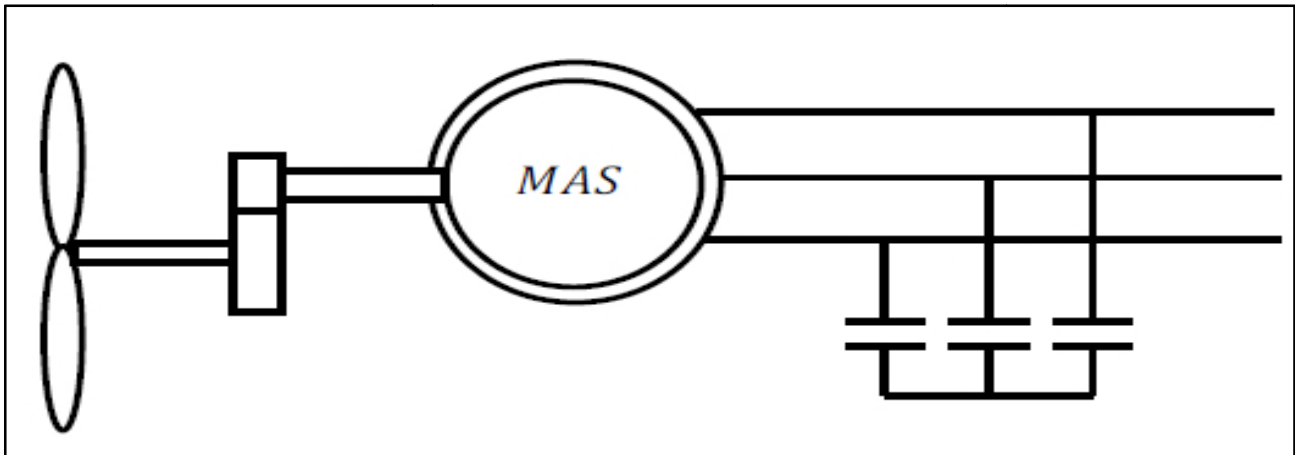


Figure II.10 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage [13]

II.2.4.2 Systèmes couplés au réseau alternatif

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes.

II.2.4.2.1 Machine synchrone

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (voir figure II.11)

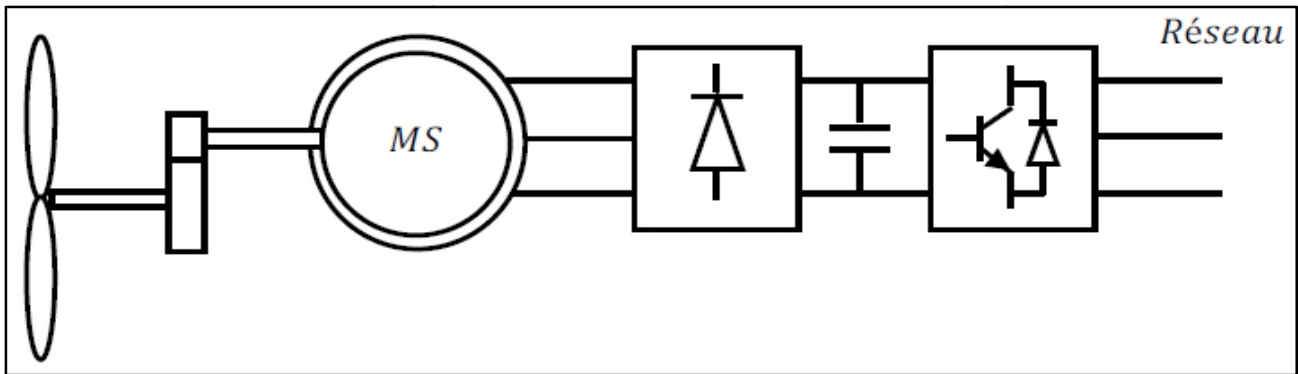


Figure II.11 : Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique [13]

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéro turbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance.

II.2.4.2.2 Machine asynchrone à cage

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Dans les années 90, les danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant (voir figure II.12).

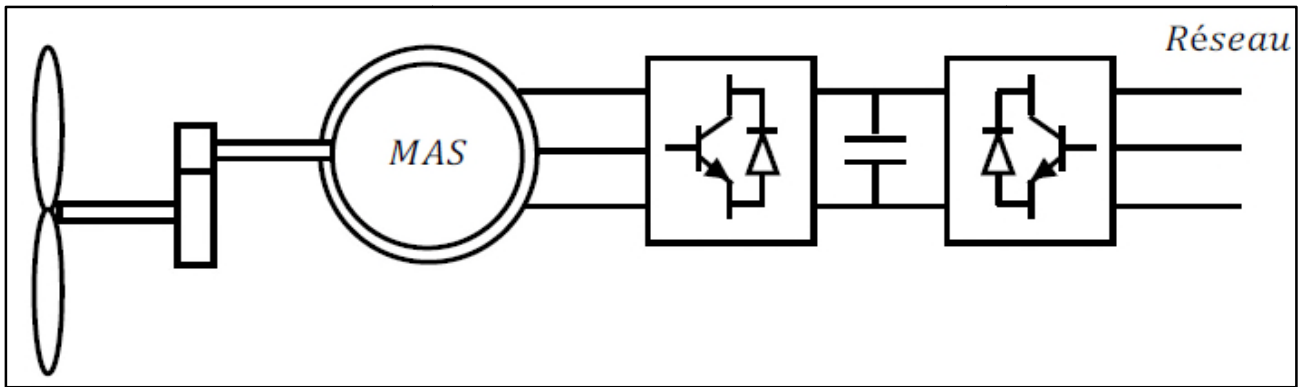


Figure II.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable [13]

II.2.4.2.3 Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone :

Le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice. [13]

II.2.5 Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne

II.2.5.1 Avantage

- ❖ L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution ni déchets. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en quelques mois.
- ❖ L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable. Il constitue donc une variable ressource renouvelable.

- ❖ L'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois en niveau de la fabrication et de l'installation.

Au-delà de la donne économique et environnementale, L'énergie éolienne suscite un intérêt particulier car elle peut favoriser la diversification et l'indépendance énergétique d'un pays.

II.2.5.2 Les inconvénients

- ❖ La pollution visuelle et sonore. La perturbation des ondes électromagnétique (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particulières et cela oblige l'installation des éoliennes loin des habitants
- ❖ Sur le plan technique, l'éolienne a quelques inconvénients par rapport à d'autres types de productions de l'énergie électrique

L'énergie éolienne est une énergie intermittente et difficilement prévisible

- ❖ Son insertion dans les réseaux électriques entraine des problèmes et des contraintes spécifiques qui doivent être prise en compte par des operateurs de réseaux. en effet, tant que ce type de production reste marginal, les contraintes sont limitées. Aussi dépeint longtemps des parcs éoliennes n'ont souvent eu pour seules « contraintes » que de produire lorsqu' il était possible de produire et de ne pas dégradé la qualité de tension sur le réseau

Aujourd'hui, du fait du développent important et toujours croissant en termes de puissance installée des parcs éoliens, ces derniers sont assujettis à des exigences techniques de plus en plus sévère imposées par des règles de raccordement aux réseaux définies à l'initiative des gestionnaires de réseaux. [14]

II.2.6 Générateur diesel

Les générateurs diesels consomment du gazole pour produire de l'énergie électrique. Ils sont principalement constitués d'un moteur diesel servant à entrainer une génératrice synchrone et offrent un moyen stable de production d'énergie à long terme. Même si de nombreux efforts sont faits dans la production de biocarburants et de filtres particuliers, les gaz nocifs (oxydes d'azote et de carbone) rejetés par la combustion diesel et le cours sans cesse grandissant du gazole sont très désavantageux. La taille des réservoirs de gazole est fonction de la capacité installée.

En général, chaque générateur diesel embarque un réservoir de stockage à court termes qui est relié à un réservoir central de plus grande capacité. Un dispositif de gestion de la commutation des générateurs est nécessaire pour les configurations à plusieurs générateurs diesels. Ce système

permet, entre autre, d'adapter la puissance produite à la demande tout en allongeant le temps moyen entre les interventions de maintenance sur chaque générateur. La présence de dispositifs d'arrêt/démarrage électriques permet une gestion intelligente et quasi-automatisée de la production.

La charge est en général constituée de maisons d'habitation, d'ateliers ou même de petites usines. Cette charge consomme de l'énergie active et réactive de manière quasi aléatoire. En effet, le profil de consommation dépend non seulement du moment de la journée, de la période dans l'année mais aussi de l'activité des usagers qui peuvent arrêter et démarrer des équipements à leur guise. Dans le cas d'un réseau continental, ces perturbations sont largement amorties, ce qui n'est pas le cas pour un réseau autonome. La fluctuation de la consommation de puissance réactive est la principale cause des problèmes de d'instabilité de la tension dans un réseau autonome. Les compensateurs employés pour stabiliser la tension peuvent être de type synchrone employant des machines synchrones, ou statiques employant de l'électronique de puissance. La tendance actuelles est à l'emploi de compensateurs synchrones statiques - STATCOM - compte tenu de leur rendement et élevé de leur facilité de mise en œuvre.

Ainsi, la production par générateurs diesel est stable et bien maîtrisée mais cependant, son caractère polluant est un désavantage majeur, vu le contexte socio-économique précédemment exposé. En outre, bon nombre de ces systèmes ont pris de l'âge et fonctionnent de moins en moins de manière optimale. [15]

Pour assurer la continuité de production d'énergie électrique dans un réseau autonome il est nécessaire de recourir au stockage d'énergie ou d'ajouter un ou plusieurs générateurs Diesel. Le générateurs Diesel est généralement composé d'un moteur Diesel couplé au générateur synchrone (Figure 13). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux du fuel dans l'objectif de garder la vitesse du moteur Diesel et la vitesse du générateurs synchrone constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur. [16]

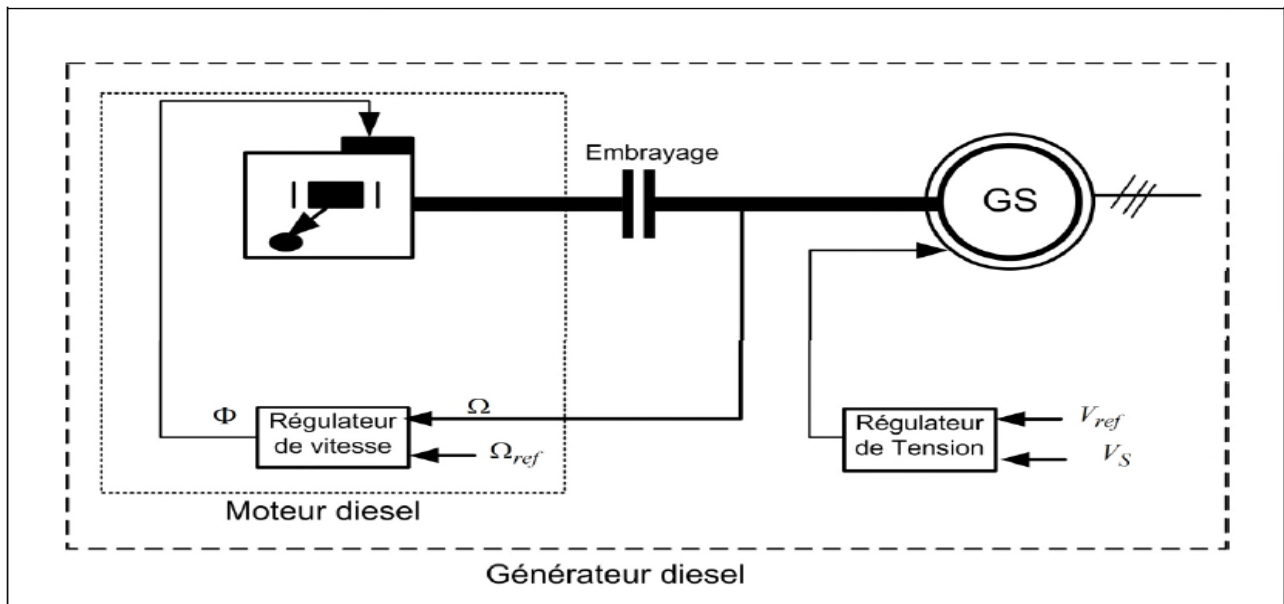


Figure II.13 : Configuration du générateur diesel [16]

II.3 Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre l'aspect de la turbine éolienne, ses différents types, Ainsi, l'architecture de l'éolienne avec ses avantages et inconvénients. En fin nous avons parlé sur le générateur diesel.

Chapitre III

Modélisation d'un micro réseau alimenté en courant alternatif

Introduction

La modélisation d'un système quelconque s'impose pour l'application d'une commande particulière. Dans le présent chapitre on s'intéressera à la modélisation d'un micro-réseau alimenté en courant alternatif connecté à un réseau, pour effectuer ce travail on va modéliser un modèle de système onduleur comprenant un ensemble complet de sous-systèmes requis pour interfacier une source renouvelable à un réseau. Le modèle est pour le mode de contrôle de courant, qui est l'un des deux principaux modes de fonctionnement relatifs à la production distribuée

III.1 Onduleur de source de tension (VSI) en mode de contrôle de courant

Dans les situations où une connexion réseau solide est disponible, c'est-à-dire un point de connexion avec une tension et fréquence régulées, il est courant d'exporter de l'énergie dans cette connexion en définissant un courant référence de l'onduleur. Cette référence peut représenter n'importe quelle combinaison de puissance active et réactive. La puissance exportée n'influencera pas de manière significative la tension ou la fréquence au point de connexion. Un schéma d'un onduleur disposé en mode contrôlé par le courant est indiqué dans la figure III.1.

L'objectif est de réguler la puissance active et réactive pour suivre les valeurs de référence (P^* et Q^*). Les références de puissance et les tensions au point de connexion (V_{oa} , V_{ob} et V_{oc}) sont utilisées pour définir des références pour les contrôleurs de courant.

L'onduleur est alimenté par une tension de circuit intermédiaire (V_{DC}) provenant de la source d'énergie d'origine. Ces variables constituent les entrées au modèle. Les variables de sortie sont (i_{oa} , i_{ob} et i_{oc}). Cela pourrait aussi être souhaitable de surveiller l'angle d'alignement de la boucle à verrouillage de phase (PLL) ou, si le modèle doit être couplé à un modèle de la source d'énergie, le courant du circuit intermédiaire (i_{DC}) peut être organisé en sortie.

La figure III.1 montre que la commande est effectuée dans un référentiel rotatif (domaine dq) et l'angle de référence pour la transformation abc-dq est fourni par la PLL. La sortie de l'onduleur est représentée avec un élément LC de second ordre et une inductance supplémentaire pour le couplage au point de connexion. Le courant de sortie (i_{odq}) est donc égal au courant dans l'inductance du filtre

moins le courant dans le condensateur connecté en shunt du filtre. C'est le courant d'inductance i_L qui est contrôlé pour suivre le courant de référence (lui-même déterminé par les références de puissance). On suppose que le courant dans le condensateur de filtre est de haute fréquence et en termes d'exportation de puissance à fréquence fondamentale, l'inductance et les courants de sortie sont essentiellement identiques. Autres variables montrées dans la figure III.1 sera discuté en détail.

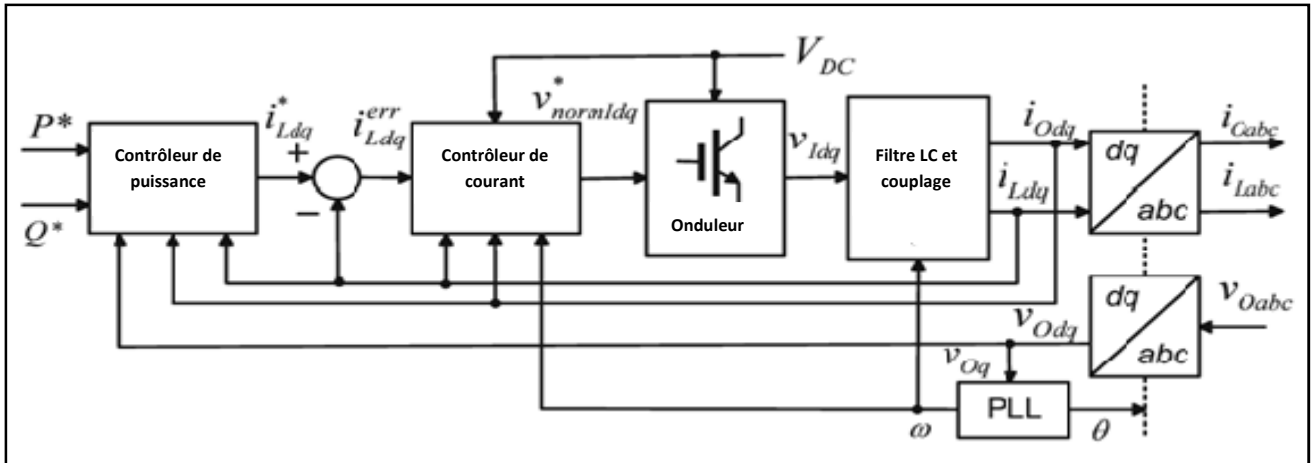


Figure III.1 : Modèle d'un VSI contrôlé en courant [17]

III.2 La transformation de park

III.2.1 La transformée directe abc-dq

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \\ v_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.1)$$

III.2.2 La transformée inverse dq –abc

Le premier sous-système dans la topologie de l'onduleur est la transformation dq-en-abc qui est Définie par (III.2).

$$\begin{bmatrix} i_{oa} \\ i_{ob} \\ i_{oc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

L'angle du cadre de rotation est traité comme une entrée de ce sous-système et il n'y a pas de variables d'état.

L'équation (III.2) représente un terme de passage de l'entrée à la sortie et aucun vecteur d'état n'est nécessaire.

III.3 Système de boucle à verrouillage de phase PLL

La forme PLL adoptée ici est basée sur l'alignement en boucle fermée de l'angle de la transformation dq telle que la tension au point de connexion n'a pas de composante d'axe q. Un régulateur PI agit sur l'erreur d'alignement pour régler la fréquence de rotation, et cette fréquence est intégrée pour donner l'angle de transformation.

Le système PLL indiqué sur la Figure III.1 est montré plus en détail sur la Figure III.2

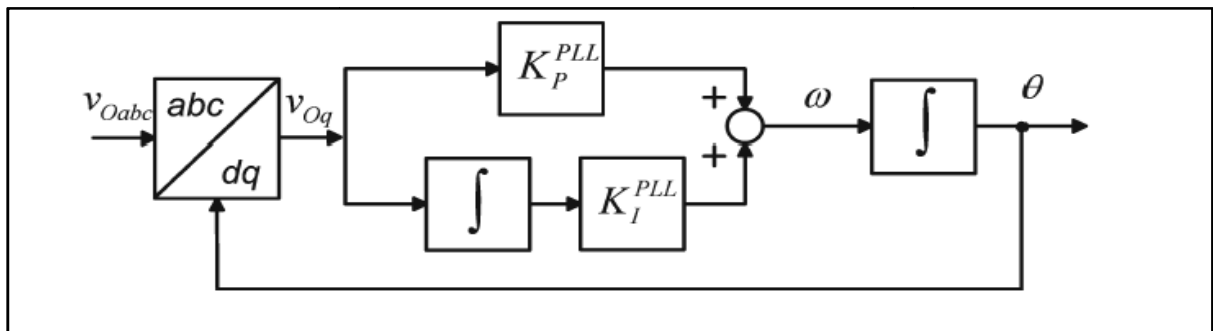


Figure III.2 : Modèle pour la PLL [17]

$$\omega = K_p^{pll} V_{oq} + K_I^{pll} \int V_{oq} dt \quad (\text{III.3})$$

$$\theta = \int \omega dt \quad (\text{III.4})$$

III.4 Contrôleurs de puissance

Le contrôleur de puissance n'est pas un contrôleur en boucle fermée mais plutôt une conversion en boucle ouverte d'une référence de puissance dans une référence de courant étant donné la tension dominante au point de connexion. Le courant est alors contrôlé en boucle fermée. Ce sous-système est non linéaire en raison de la nécessité de diviser la puissance par la tension pour obtenir le courant et il contient une dynamique d'ordre supérieur en raison du filtre utilisé. Le sous-système est illustré en Figure III.3.

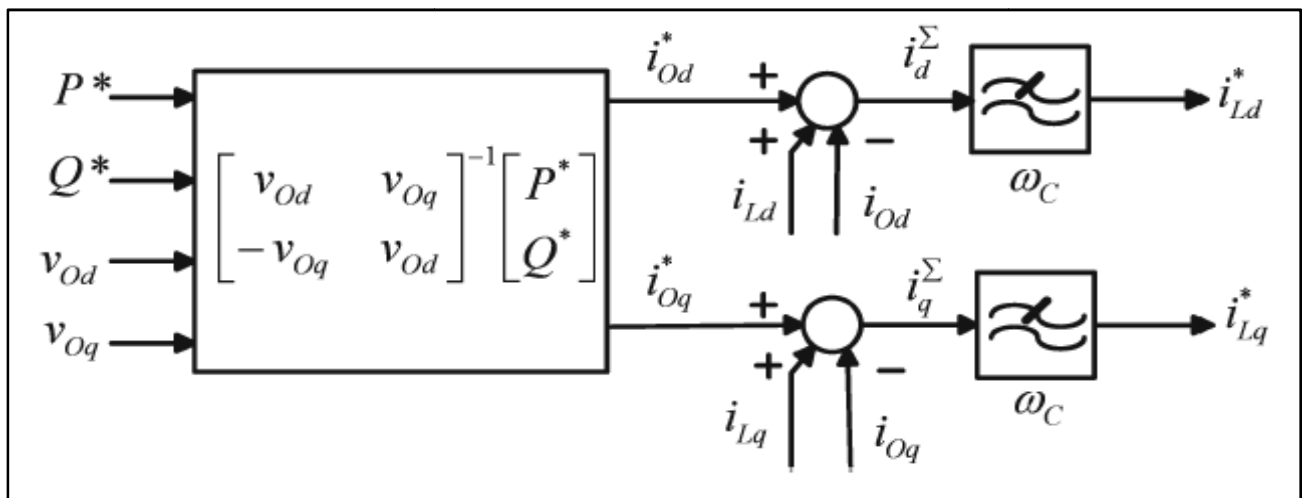


Figure III.3 : contrôleur d'alimentation [17]

P^* et Q^* : puissance active et réactive de référence

v_{od} et v_{oq} : tension de réseau

i^*_{od} et i^*_{oq} : courants de référence

i_{odq} et i_{ldq} : les courants filtre

Les courants de sortie souhaités sont calculés à l'aide de la paire d'équations suivante:

$$P^* = v_d * i_d + v_q * i_q \tag{III.5}$$

$$Q^* = v_d * i_d - v_q * i_q \tag{III.6}$$

On peut avoir :

$$i_{od}^* = \frac{v_{od}P^* - v_{oq}Q^*}{v_{od}^2 + v_{oq}^2} \quad (\text{III.7})$$

$$i_{oq}^* = \frac{v_{oq}P^* + v_{od}Q^*}{v_{od}^2 + v_{oq}^2} \quad (\text{III.8})$$

C'est en fait le courant d'inductance du filtre qui est contrôlé et donc un ajustement doit être fait à la référence pour tenir compte du courant du condensateur. Ceci est effectué en utilisant le courant d'inductance mesuré et le courant de sortie mesuré:

$$i_d^\Sigma = i_{od}^* + (i_{ld} - i_{od}) \quad (\text{III.9})$$

$$i_q^\Sigma = i_{oq}^* + (i_{lq} - i_{oq}) \quad (\text{III.10})$$

Ces références de courant peuvent contenir des termes d'harmonique et de bruit en raison de la distorsion de la tension au point de connexion. Ceux-ci sont supprimés de la référence par un filtre passe-bas. En raison de la fréquence de coupure relativement faible requise de ce filtre, il peut apporter une contribution importante à la dynamique du système et devrait être inclus dans le modèle. Une fonction de transfert passe-bas de Butterworth du second ordre est considérée comme représentative du filtre susceptible d'être utilisé. L'équation (5) et (6) montre les références des contrôleurs courants, i_{ld}^* et i_{lq}^* , formées par le produit d'un filtre générique et les termes de (III.4)

$$i_{ld}^* = \frac{\omega_c^2}{s^2 + \sqrt{2}s\omega_c + \omega_c^2} i_d^\Sigma \quad (\text{III.11})$$

$$i_{lq}^* = \frac{\omega_c^2}{s^2 + \sqrt{2}s\omega_c + \omega_c^2} i_q^\Sigma \quad (\text{III.12})$$

III.5 Contrôleur de courant

Le contrôleur de courant indiqué dans la Figure III.1 est implémenté en tant que paire de contrôleurs PI avec des termes de découplage transversal et des termes d'anticipation pour la tension de connexion. Parce que l'onduleur représente (en moyenne) un gain égal à la tension du circuit intermédiaire, il est souhaitable d'inclure une division par la tension du circuit intermédiaire afin que l'onduleur reste un terme de gain normalisé même si la tension du circuit intermédiaire varie. Le schéma fonctionnel du contrôleur est illustré à la Figure III.4. [17]

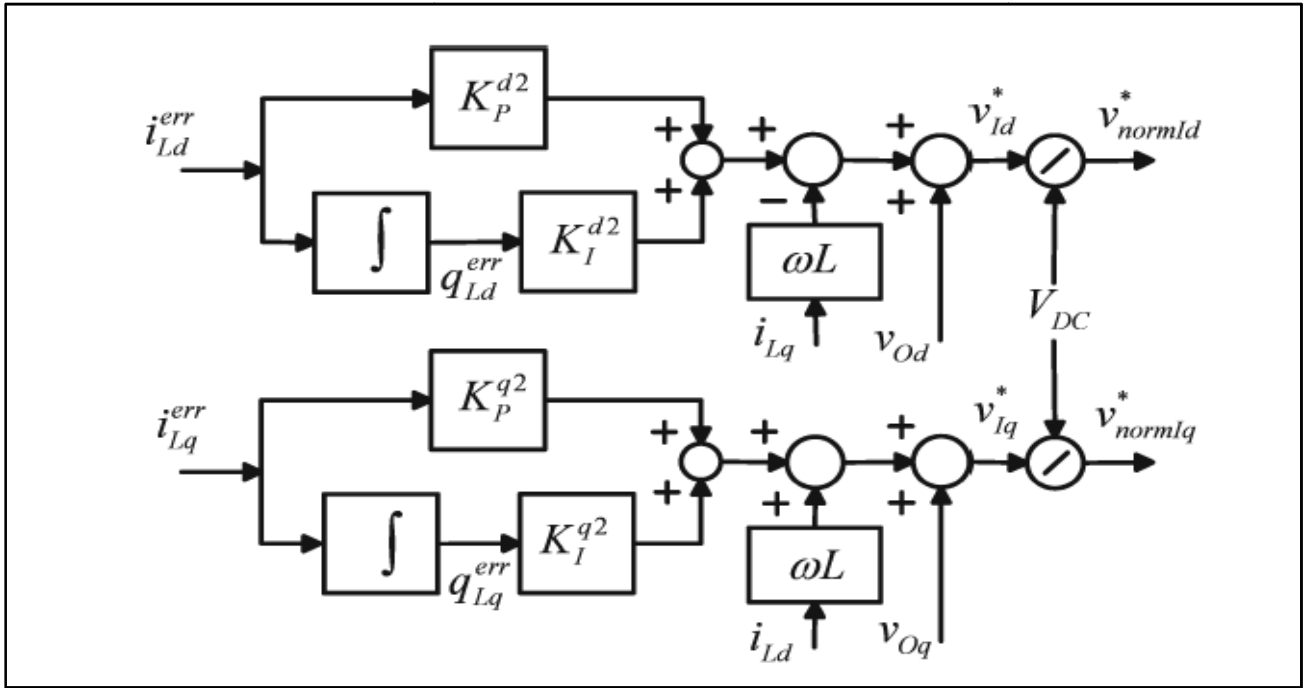


Figure III.4 : Modèle pour le contrôleur de courant [17]

k_p^d et K_i^d : Gains dans la branche d

k_p^q k_i^q : Gains dans la branche q

v_{ldq} : Tension au sorite de l'onduleur

$$v_{id}^* = v_{od} - \omega L i_{lq} + k_p^{d2} i_{Ld}^{err} + k_i^{d2} \int i_{Ld}^{err} dt \tag{III.13}$$

$$v_{iq}^* = v_{oq} - \omega L i_{ld} + k_p^{q2} i_{Ld}^{err} + k_i^{q2} \int i_{Lq}^{err} dt \tag{III.14}$$

Et :

$$q_{Ld}^{err} = \int i_{Ld}^{err} \tag{III.15}$$

$$q_{Lq}^{err} = \int i_{Lq}^{err} \tag{III.16}$$

III.6 Modèle de l'onduleur

L'onduleur lui-même est un circuit à découpage et aux fins de ce développement de modèle, on suppose que la fréquence de commutation est suffisamment élevée pour que l'action de commutation elle-même n'affecte pas l'évolution des états et que la moyenne de l'espace d'états peut être appliquée. En d'autres termes, l'ondulation de fréquence de commutation d'états tels que les courants d'inductance peuvent être ignorés sans affecter significativement la précision avec laquelle le courant d'inductance moyen est prédite. On s'attend à ce que le filtre passe-bas passif à la sortie de l'onduleur ait été choisi pour atténuer l'ondulation de la fréquence de commutation à des niveaux acceptables. En tant que fréquences de commutation la générateur distribué commerciale les onduleurs continuent de s'améliorer, cette approximation devient meilleure. Il peut y avoir des onduleurs de forte puissance avec de basses fréquences de commutation (moins de 1 kHz) où la taille physique et le coût du filtre ont été limités et où les hypothèses de calcul de la moyenne de l'espace d'états ne sont pas strictement valables. L'action de commutation de l'onduleur étant négligée, le modèle de l'onduleur peut être simplifié à un gain de tension saturé, comme indiqué sur la Figure III.5.

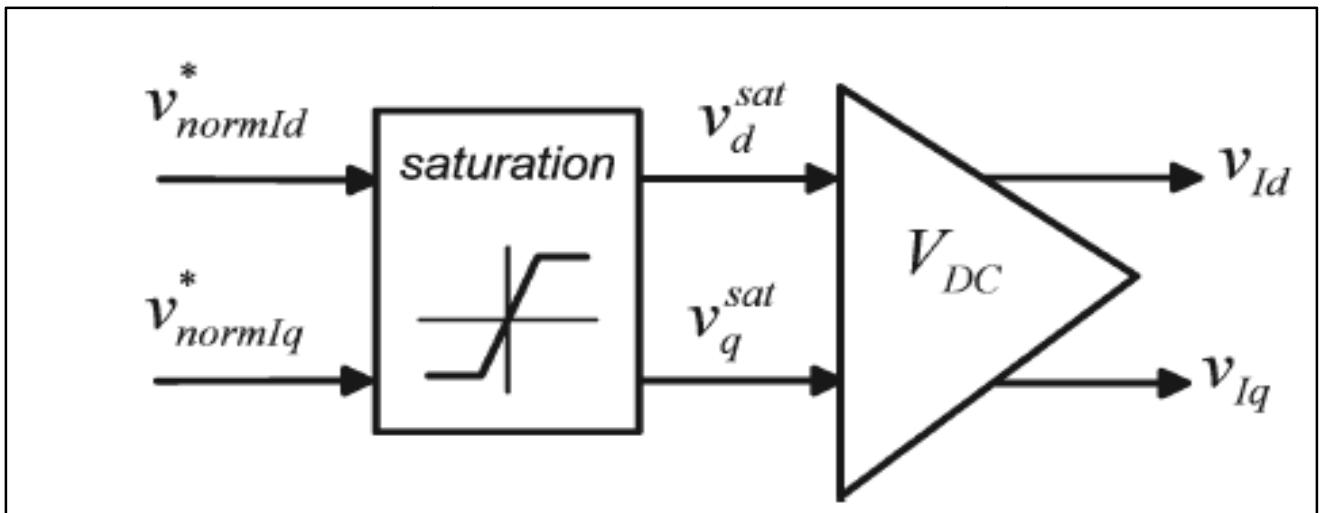


Figure III.5 : Modèle simplifié d'un onduleur [17]

III.6.1 Modèle informatisé de saturation

Saturation

si

$$(v_{\text{normald}}^*)^2 + (v_{\text{normalq}}^*)^2 \geq 1/2 \quad (\text{III.17})$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_{\text{normalq}}^*}{v_{\text{normald}}^*} \quad (\text{III.18})$$

$$v_d^{\text{sat}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta) \quad (\text{III.19})$$

$$v_q^{\text{sat}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\theta) \quad (\text{III.20})$$

Si non

$$v_d^{\text{sat}} = v_{\text{normald}}^* \quad (\text{III.21})$$

$$v_q^{\text{sat}} = v_{\text{normalq}}^* \quad (\text{III.22})$$

Fin.

III.7 Filtre LC et de l'impédance de couplage

Bien que l'ondulation de la fréquence de commutation ait été écartée du modèle, le filtre passe-bas passif doit toujours être inclus dans le modèle. La sélection des inductances et des condensateurs de ce filtre implique un certain compromis de conception et le filtre aura des effets dynamiques importants jusqu'à des fréquences assez basses. Ce sous-système comprend à la fois l'inductance de couplage qui est toujours présente et tout composant de filtre supplémentaire. L'impédance de couplage pourrait en réalité être une inductance de couplage ou l'impédance de fuite d'un transformateur de couplage. S'il s'agit bien d'une inductance de couplage, le filtre LC devient un filtre LCL.

Le filtre LC (supposé symétrique) dans le cadre de référence abc est représenté sur la Figure III.6 [17]

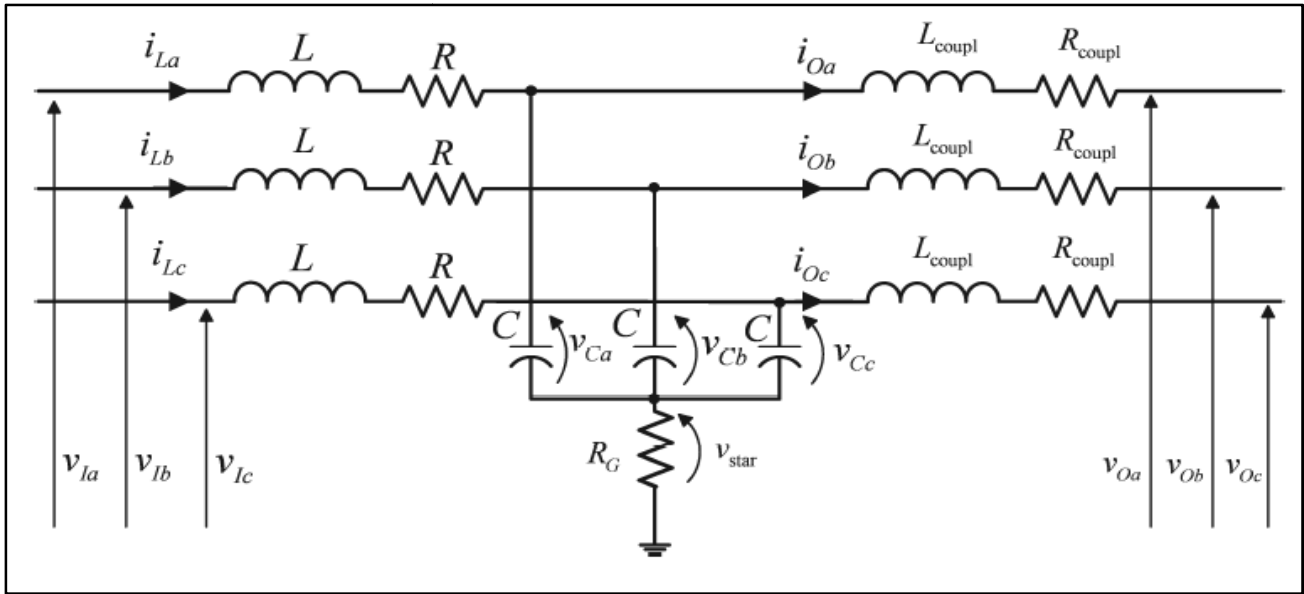


Figure III.6 : Filtre LC et charge [17]

$$v_{ia} = Ri_{ia} + L \frac{di_{ia}}{dt} + v_{ca} + v_{star} \tag{III.23}$$

$$v_{oa} = v_{ca} + v_{star} - L_{coupl} \frac{di_{oa}}{dt} - i_{oa} R_{coupl} \tag{III.24}$$

$$C \frac{dv_{ca}}{dt} = i_{ia} + i_{oa} \tag{III.25}$$

$$v_{star} = 3R_g(i_{ia} + i_{oa}) \tag{III.26}$$

Les Courants a la sortie du filtre :

$$\frac{di_{ld}}{dt} = -\frac{r_f}{L_f} i_{ld} - \frac{1}{L_f} v_{ld} + \frac{1}{L_f} v_{cd} + \omega_{pll} i_{lq} \tag{III.27}$$

$$\frac{di_{lq}}{dt} = -\frac{r_f}{L_f} i_{lq} - \frac{1}{L_f} v_{lq} + \frac{1}{L_f} v_{cq} - \omega_{pll} i_{ld} \tag{III.28}$$

$$\frac{di_{od}}{dt} = -\frac{r_c}{L_c} i_{cd} - \frac{1}{L_c} v_{cd} + \frac{1}{L_c} v_{od} + \omega_{pll} i_{oq} \tag{III.29}$$

$$\frac{di_{oq}}{dt} = -\frac{r_c}{L_c} i_{cq} - \frac{1}{L_c} v_{cq} + \frac{1}{L_c} v_{oq} - \omega_{pll} i_{od} \tag{III.30}$$

La tension ou borne de la capacité :

$$\frac{dv_{cd}}{dt} = -\frac{1}{c_f} i_{ld} + \frac{1}{c_f} i_{od} + \omega_{pll} V_{oq} - R_d \frac{di_{ld}}{dt} + R_d \frac{di_{od}}{dt} \quad (\text{III.31})$$

$$\frac{dv_{cq}}{dt} = -\frac{1}{c_f} i_{lq} + \frac{1}{c_f} i_{oq} - \omega_{pll} V_{od} - R_d \frac{di_{lq}}{dt} + R_d \frac{di_{oq}}{dt} \quad (\text{III.32})$$

III.8 Conclusion :

Nous avons traité dans ce chapitre la modélisation d'un micro-réseau alimenté en courant alternatif.

Chapitre IV

Simulation et analyse de cas d'étude

Introduction

La simulation d'un système nous permet d'avoir une vue réelle sur son comportement avant sa mise en œuvre sur le terrain. Cette simulation nous permet d'avoir des résultats très proche du réel.

Dans ce chapitre, nous allons voir la simulation d'un micro-réseau alimenté en alternatif en interprétant les résultats obtenus.

Le travail sera concentré sur l'étude de l'état du réseau pour quatre scénarios différent :

- Sans perturbation.
- La puissance active P perturbée.
- La puissance réactive Q perturbée.
- La puissance P et Q perturbées.

IV.1 Simulation du système global avec MATLAB

Le schéma de simulation du système globale du Micro-Réseau étudié avec MATLAB est illustré sur la figure IV.1 (pour le zoom de ce montage et les paramètres de simulation voir l'annexe)

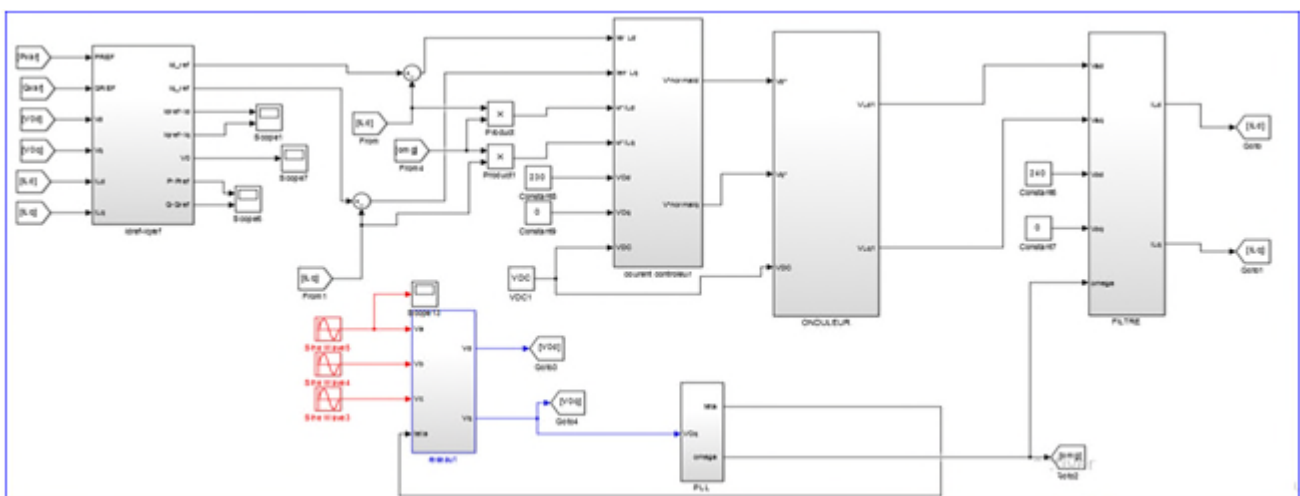


Figure IV.1 : le montage global de simulation

IV.2 Résultats de simulation

Après la réalisation du montage sur MATLAB on a obtenu les résultats suivants :

IV.2.1 Sans variation de charge : on a obtenu les résultats illustrés dans les figures IV.2 et IV.3

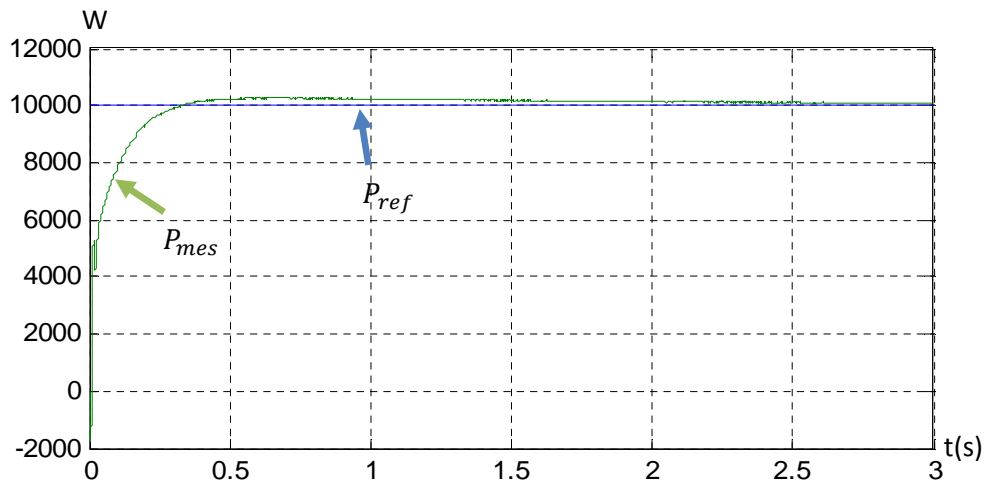


Figure IV.2 : la puissance active P

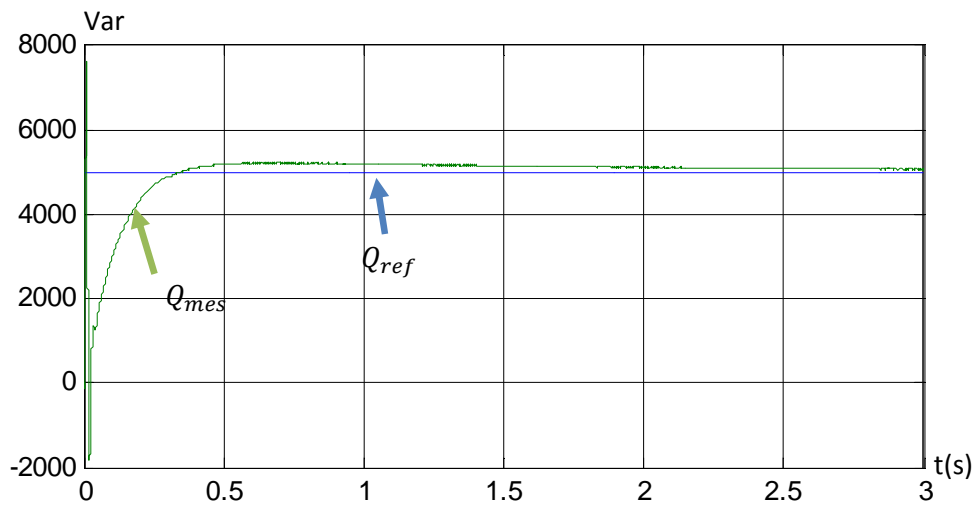


Figure IV.3 : la puissance réactive Q

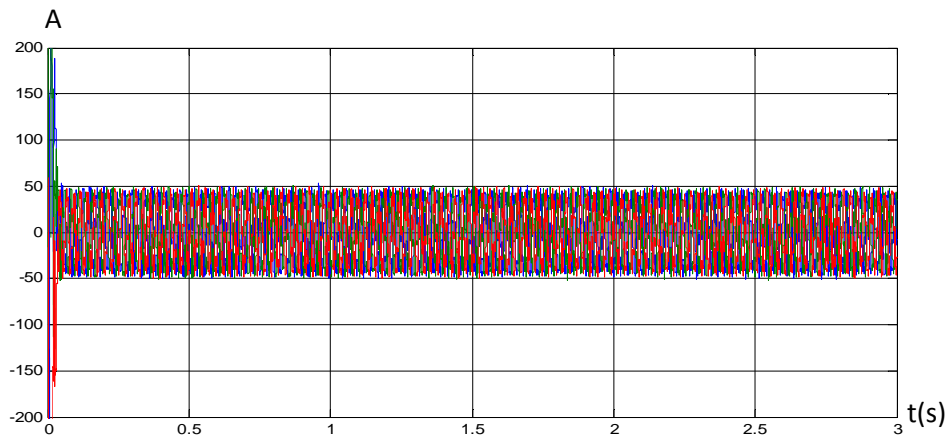


Figure IV.4 : Courant après la capacité

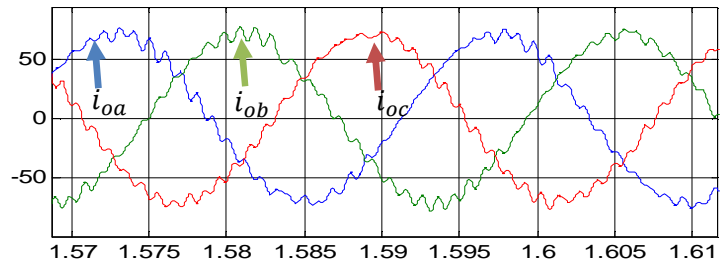


Figure IV.5 : Avec le Zoom

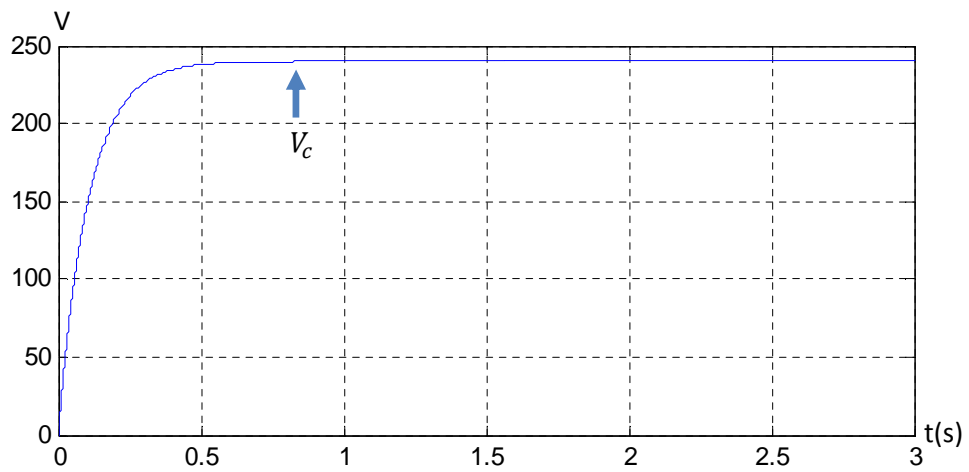


Figure IV.6 : la tension au borne de la capacité

Interprétation

Dans ce cas on a fixé les valeurs de la puissance active et réactive à des valeurs de référence 10KW et 5KVar respectivement, on remarque à partir de la figure IV.2 et la figure IV.3 que les deux puissances suivent la valeur de référence à $t=0.5s$.

Pour le courant représenté dans la figure IV.4, on remarque qu'ils se stabilisent à une valeur fixe (voir le zoom dans la figure IV.5).

Pour la tension au borne de la capacité (la même que celle de réseau) il attend la valeur 240V à partir de $t=0.5s$ et elle se stabilise à cette valeur.

IV.2.2 la puissance active P est variée

Dans cette étape on va jouer sur la puissance active de référence P_{ref} on va l'augmenter à 20KW sans toucher la puissance réactive Q et les résultats sont les suivants :

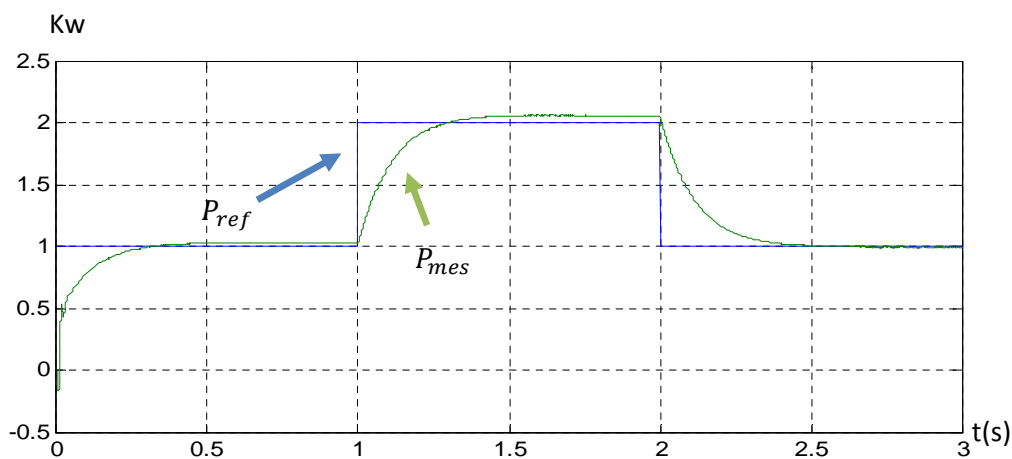


Figure IV.7 : la puissance active P

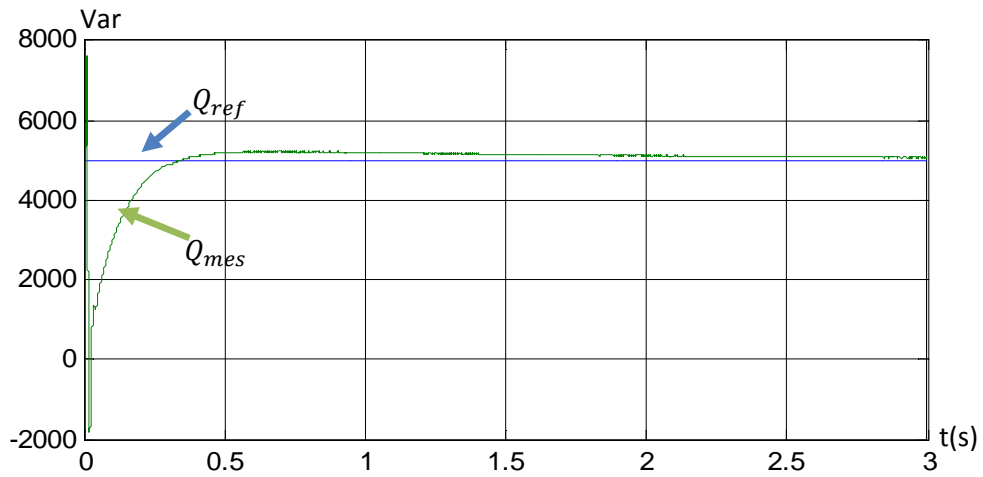


Figure IV.8 : la puissance réactive Q

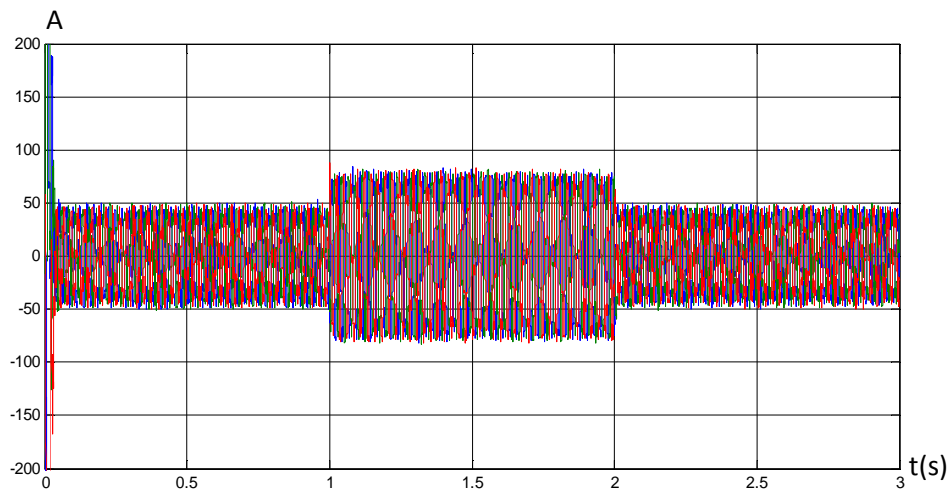


Figure IV.9 : courant après la capacité

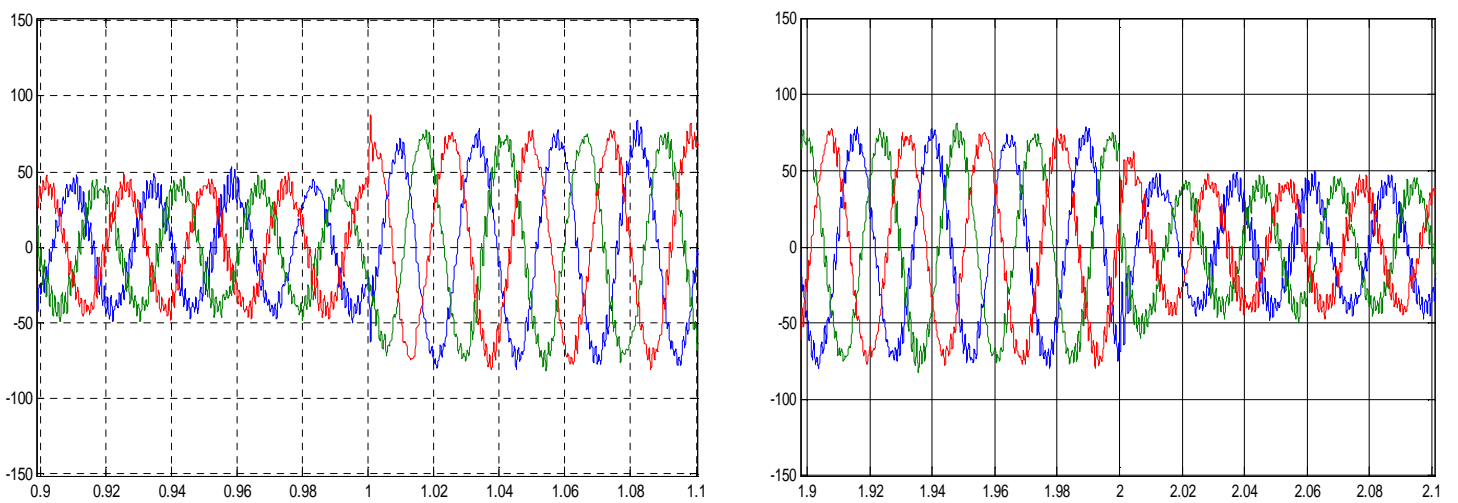


Figure IV.10 : Le Zoom de courant après la capacité

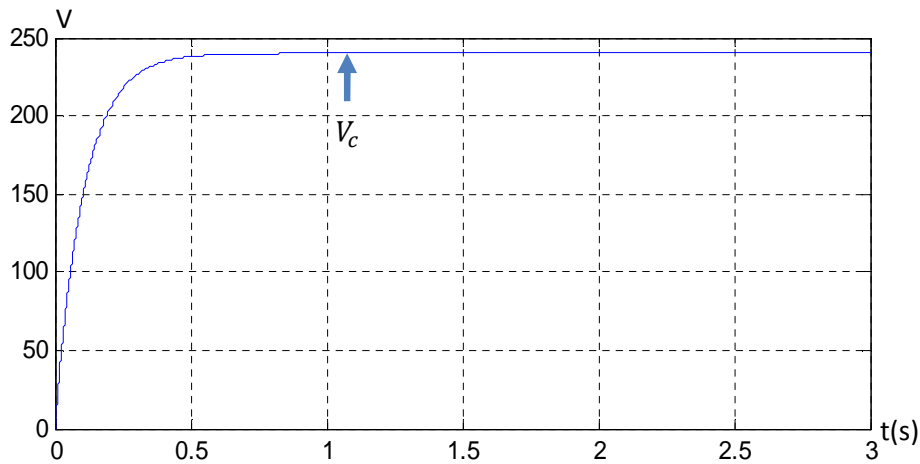


Figure IV.11: la tension au borne de la capacité

Interprétation

Dans ce deuxième cas pour la puissance active P représenté dans la figure IV.7 on remarque que P_{mes} augmente à 20KW ensuite elle revient à la valeur initiale 10KW en suivant la valeur de référence P_{ref} , par contre la puissance réactive ne subit aucun changement elle garde la même forme de premier cas.

Pour le courant représenté dans les figures IV.9 on remarque qu'il suit les mêmes variations de la puissance active P c'est à dire l'augmentation et la diminution de cette dernière et dans les mêmes temps aussi.

Pour la tension au borne de la capacité (la même que celle de réseau) il attend la valeur 240V à partir de $t=0.5s$ et elle se stabilise à cette valeur.

IV.2.3 Q est variée

Dans cette étape on va jouer sur la puissance réactive de référence Q_{ref} on va la diminuer de 5KVar à 2KVar à $t=1s$ ensuite elle revient à la valeur initiale à $t=2s$ sans toucher la puissance active P et les résultats sont les suivants :

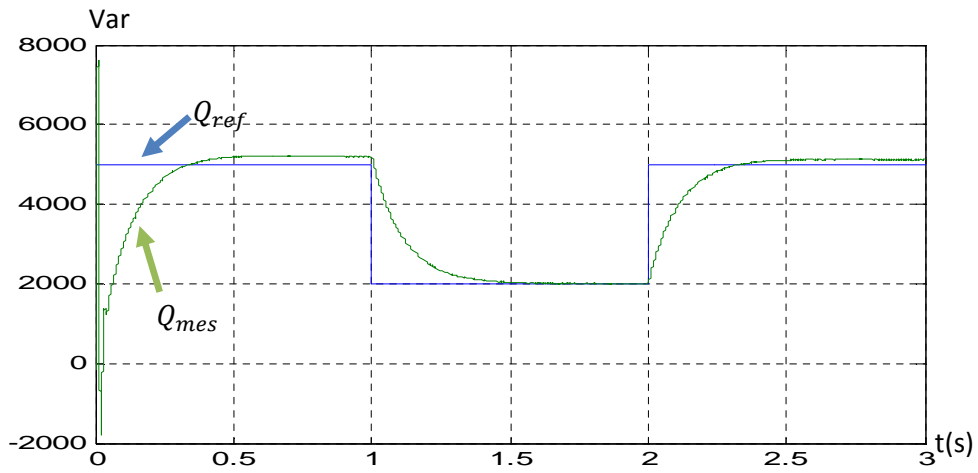


Figure IV.12 : la puissance réactive Q

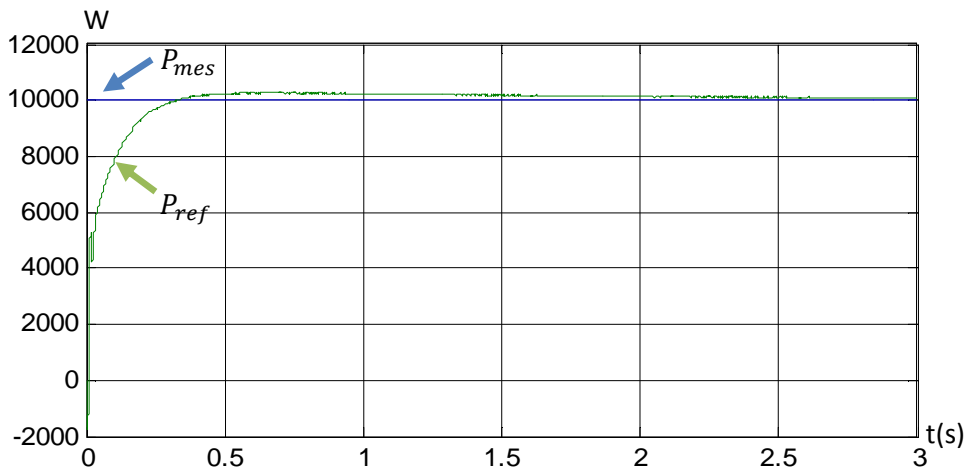


Figure IV.13 : la puissance active P

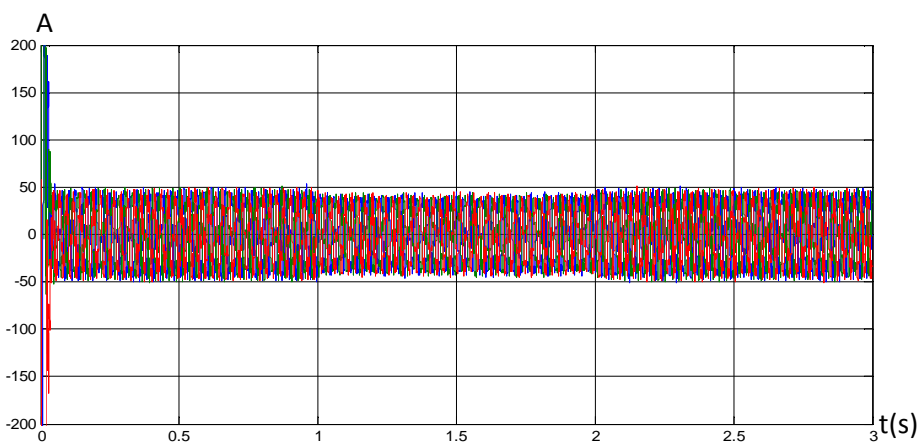


Figure IV.14 : le courant après la capacité

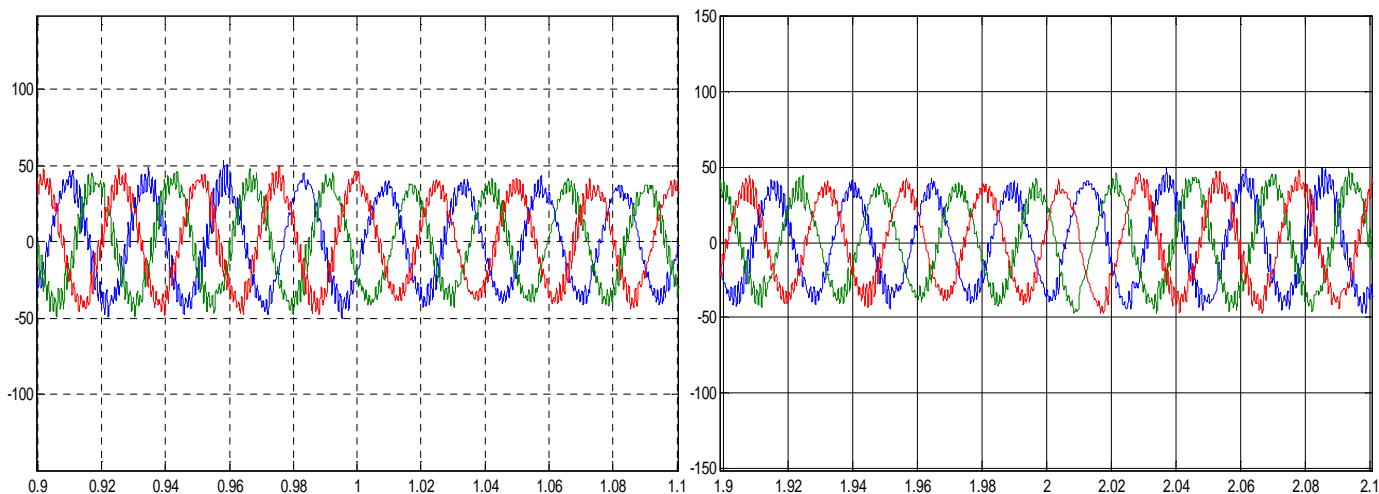


Figure IV.15 : Le Zoom de courant après la capacité

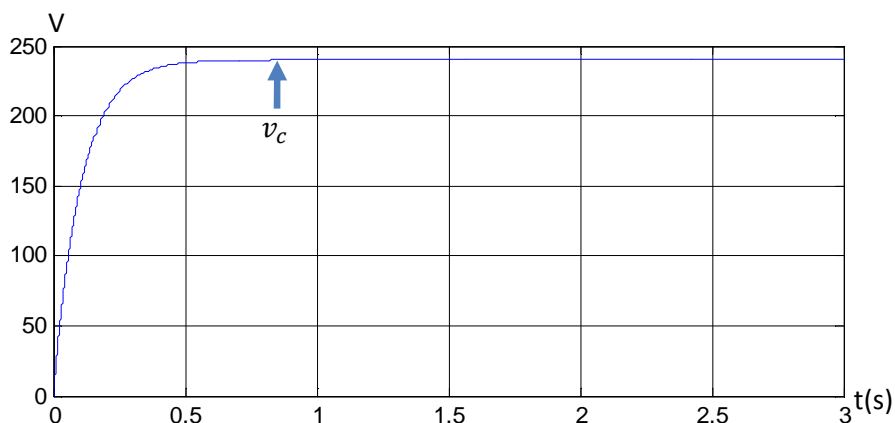


Figure IV.16 : la tension au borne de la capacité

Interprétation

Dans ce cas pour la puissance réactive Q représenté dans la figure IV.12 on remarque que Q_{mes} suit la même variation de cette puissance de référence, par contre la puissance active ne subit aucun changement elle se stabilise à la valeur de référence $P=10KW$.

Pour le courant représenté dans la figure IV.14 on remarque qu'il suit la même variation de la puissance réactive Q c'est à dire la diminution de cette dernière et dans le même temps aussi.

Pour la tension au borne de la capacité (la même que celle de réseau) il attend la valeur 240V à partir de $t=0.5s$ et elle se stabilise à cette valeur.

IV.2.4 la puissance P et Q variées

Dans cette étape on va jouer sur la puissance active de référence P_{ref} on va l'augmenter à 20KW on diminuant la puissance réactive de référence Q_{ref} de 5KVar à 2KVar et les résultats sont les suivants :

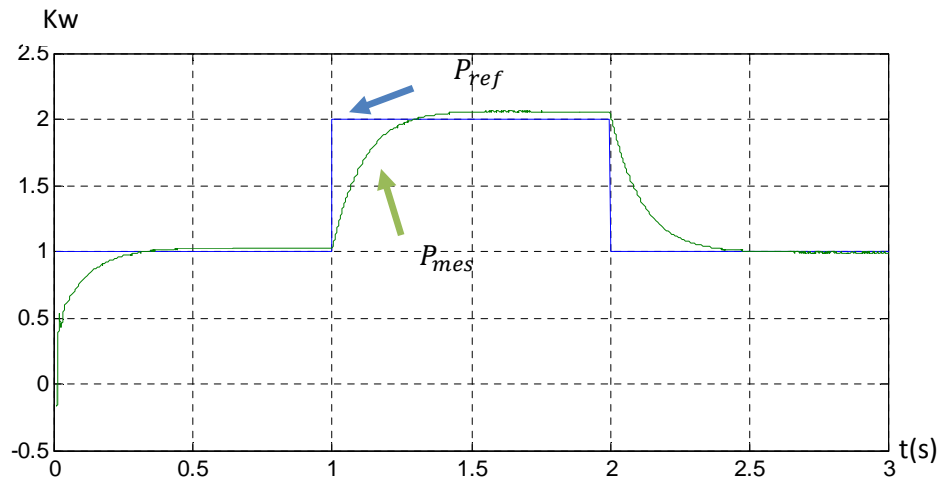


Figure IV.17 : la puissance active P

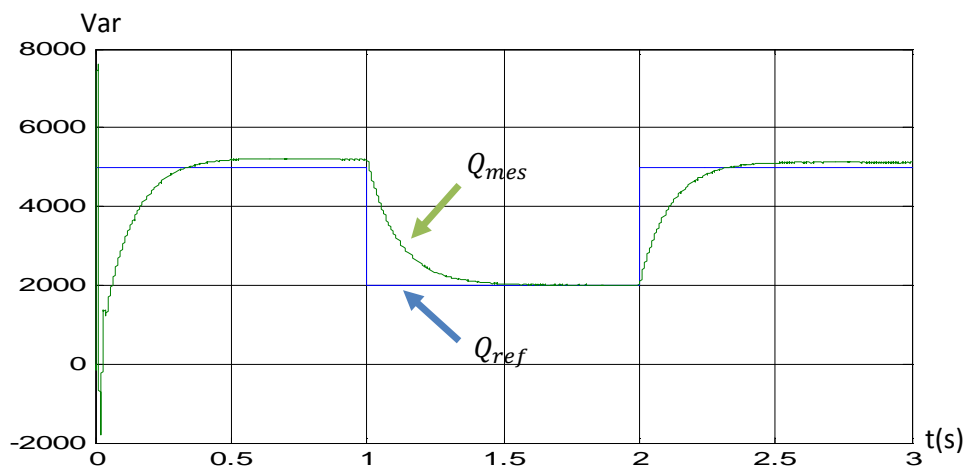


Figure IV.18 : la puissance réactive Q

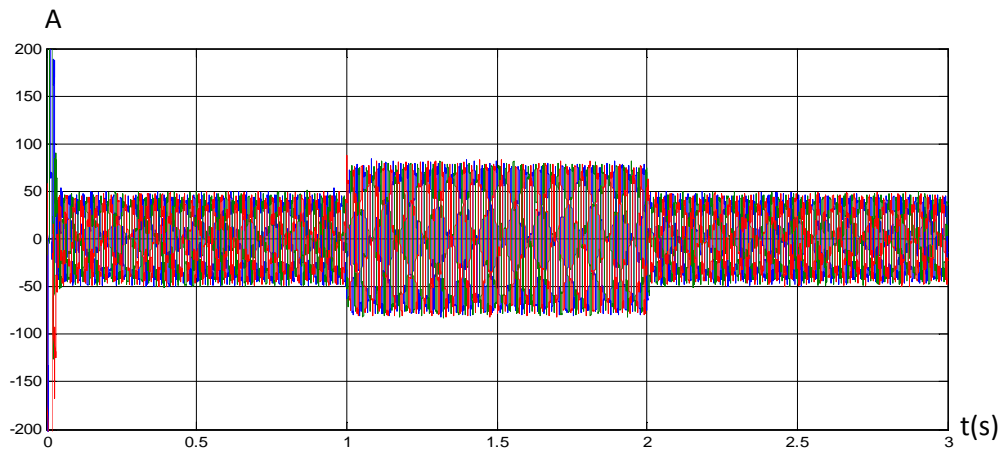


Figure IV.19 : courant après la capacité

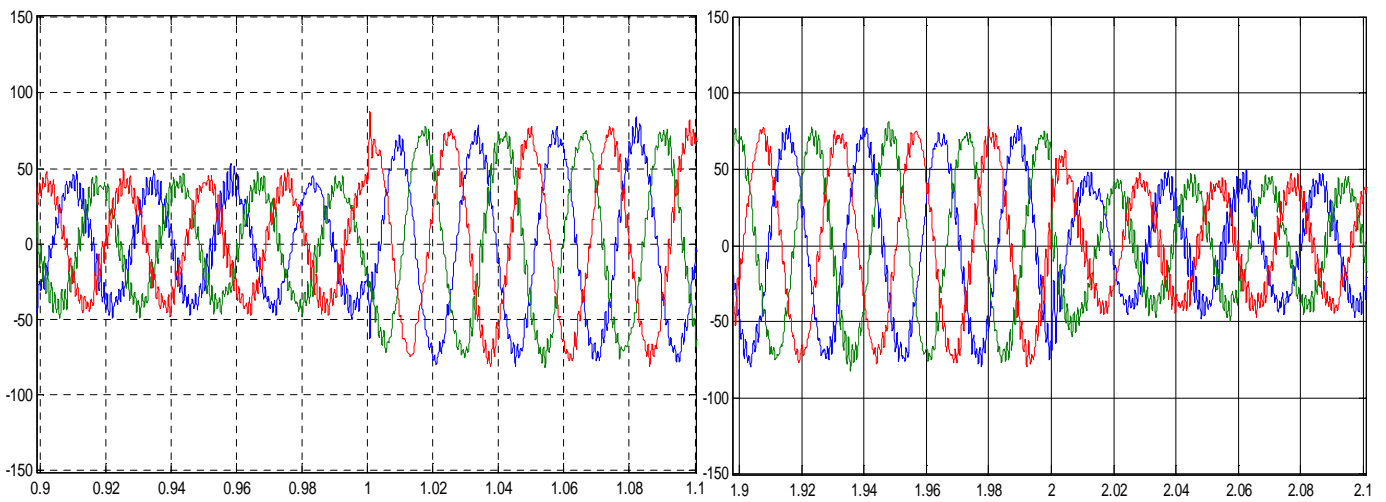


Figure IV.20 : Le Zoom de courant après la capacité

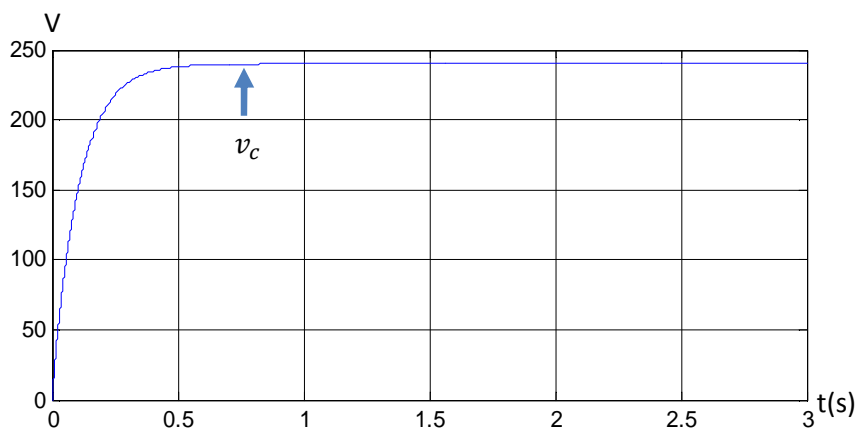


Figure IV.21 : la tension au borne de la capacité

Interprétation

Dans ce dernier cas pour la puissance active P on remarque que la variation est la même que celle de deuxième cas et la variation de la puissance réactive Q suit la même variation que celle de troisième cas.

Pour le courant présenté dans la figure IV.19 on remarque qu'il suit la variation de la puissance ils augmente à $t=1s$ et ils revient à ses valeurs initiales à $t=2s$.

Pour la tension au borne de la capacité (la même que celle de réseau) il attend la valeur 240V à partir de $t=0.5s$ et elle se stabilise à cette valeur.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu le montage avec MATLAB/SIMULINK d'un exemple pratique de micro-réseau alimenté en courant alternatif.

Ensuite, on a supposé quatre scénarios différents afin de voir l'état des puissances actives et réactives et le courant à la sortie de filtre ainsi, la tension au borne de la capacité (la même que celle de réseau) tout en donnant des interprétations.

Conclusion générale

Un réseau électrique est un système complexe. L'analyse et le contrôle d'un tel système se révèlent extrêmes difficile. Déployer une stratégie de contrôle globale sur les réseaux électriques actuels s'avère un véritable défi. Une solution serait de décomposer le réseau en sous-réseaux interconnectés, appelés les micro-réseaux.

Un micro-réseau peut être défini comme étant un système d'énergie comprenant des producteurs d'énergies distribuées, de multiples charges électriques et des systèmes de stockage. Ils peuvent être exploités en étant connecté à d'autre réseaux (ou au réseau principal) ou sans aucun apport d'énergie de l'extérieur.

L'étude menée dans notre travail est l'analyse d'un micro-réseau connecté à un réseau. Le travail effectué a été subdivisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, Nous avons traité les différents types de la production décentralisée, le micro-réseau sa définition et ses différents types, Ainsi, ses avantages et inconvénients. En fin nous avons parlé sur le micro-réseau intelligent.

Dans le second chapitre, nous avons traité l'aspect de la turbine éolienne, ses différents types, Ainsi, l'architecture de l'éolienne avec ses avantages et inconvénients. En fin nous avons parlé sur le générateur diesel.

Dans le troisième chapitre, nous avons traité la modélisation d'un micro-réseau connecté à un réseau.

Nous avons consacré le dernier chapitre à la présentation des résultats obtenus par la simulation sous MATLAB, ou on a réguler la puissance active et réactive pour suivre les valeurs de référence (P^* et Q^*).

Références Bibliographique

- [1] : SAIM ABDELHAKIM, « Commande à base de descripteurs flous d'une architecture de génération distribuée », Thèse doctorat, université mouloud maamri, Soutenu publiquement le 22 Juin 2017.
- [2] : H. MENICHE R. OUALI, « Îlotage du système électrique avec présence de générateurs décentralisés », Mémoire de fin d'études, Université A. MIRA de Bejaia, 04 juillet 2019.
- [3] : JEAN DOBROWOLSKI, « Modélisation, contrôle/commande et certification d'un micro-réseau électrique décentralisé avec entrées exogènes aléatoires et informations contraintes. Energie électrique », thèse doctorat, Université Grenoble Alpes, 2017. Français.
- [4] : B. SARAF. FARIDA, « Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un microgrid », Mémoire de fin d'études, Soutenu publiquement le 12/06/2016.
- 5) : TOMMY ANDY, THEUBOU TAMEGHE Ph. D. « contribution à la mise en œuvre et à la commande de micro réseau de cogénération modulaire (injection de puissance et stabilisation de fréquence) », thèse de doctorat, université du QUÉBEC, Décembre 2019.
- [6] : AURELIE CHABAUD, « Micro-réseau intelligent pour la gestion des ressources énergétiques », Automatique / Robotique, Université de Perpignan Via Domitia, 2014.
- [7] : HRISTIYAN KANCHEV, « Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain », Thèse de doctorat, Soutenu le 24 janvier 2014, Thèse préparée dans le Laboratoire L2EP (EA2697) à l'Ecole Centrale de Lille et à l'Université Technique de Sofia Ecole Doctorale SPI 072 (EC Lille).
- [8] : DRIS MIDA, « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride « Eolien – Photovoltaïque », Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider– Biskra, 2019.

[9] : N.HACENNA, « Intégration des énergies éoliennes dans le réseau électrique », Mémoire, 02 / 07 / 2019.

[10] : BERNARD MULTON, OLIVIER GERGAUD, HAMID BEN AHMED, XAVIER ROBOAM, STEPHANE ASTIER, ET AL,«Etat de l'art des aérogénérateurs » L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-154, 2002.

[11] : M.HACIL, « Amélioration des Performances des Energies Eoliennes », thèse doctorat, université MENTOURI - CONSTANTINE, Soutenu le : 03 /05 / 2012.

[12] : ABDELKARIM CHEMIDI, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », thèse de doctorat, Université Abou BekrBelkaid- Tlemcen 2014-2015.

[13] : TOUAL BELKACEM, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable »,diplôme de Magister, Soutenu le 17/10/2010.

[14] : AZZOUZ TAMAARAT, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA »,Thèse doctorat, université Mohamed Khider-Biskra, 08/12/2015.

[15] : TOMMY ANDY THEUBOU TAMEGHE, « modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale », université du QUÉBEC, Aout 2012.

[16] : MILOUD REZKALLAH, « amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien-diesel », université duQUÉBEC, 28 avril 2010.

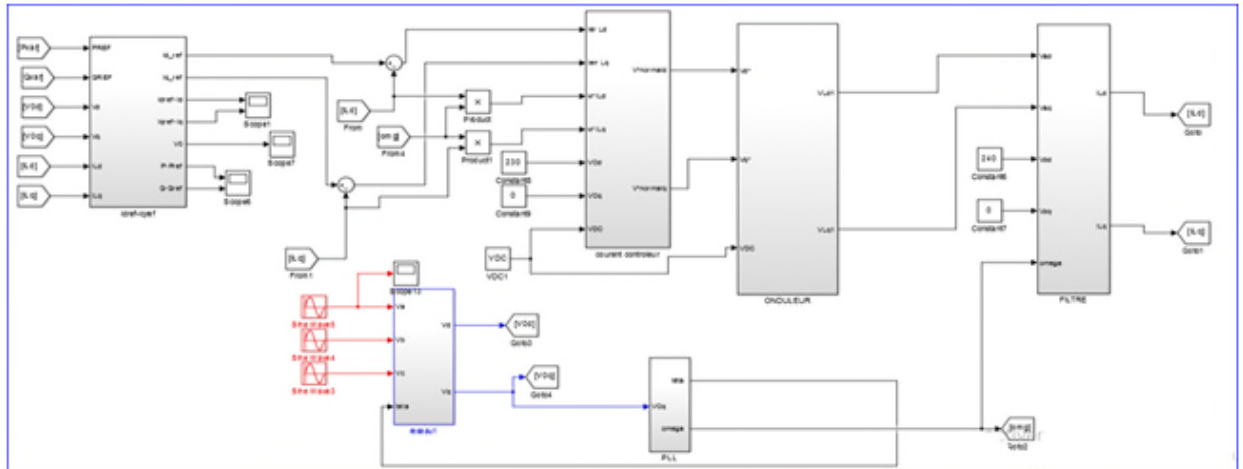
[17] : N. Kroutikova, C. Hernandez-Aramburo, and T. Green, « State space model of voltage controlled inverters for distributed energy sources », Companion paper under review, 2006.

Annexe

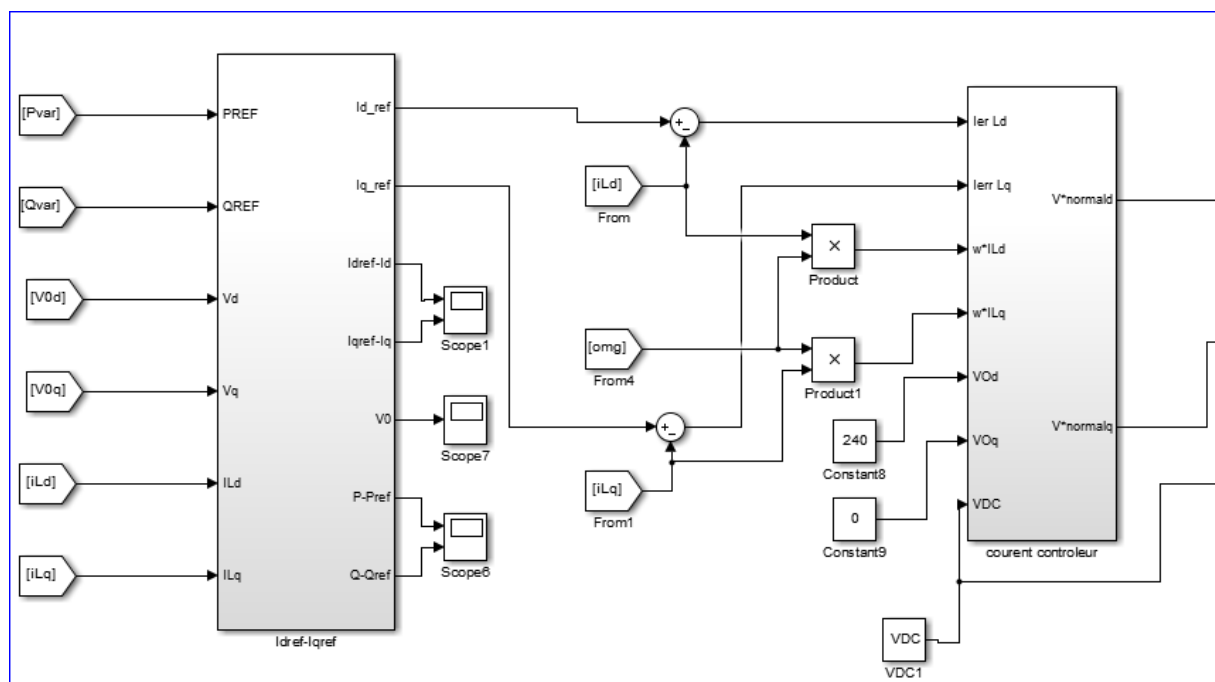
1) Les paramètres de simulation

| paramètre | | valeur |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Tension nominal de phase | | 240V |
| Fréquence de réseaux | | 50Hz |
| Impédance de couplage | | $(0.131+j\omega 0.096)\Omega$ |
| Bus continue VDC | | 1000V |
| Pulsation de coupure | | 3.14 rad/s |
| Filtre | Inductance | 0.135mH |
| | Résistance | 0.056 Ω |
| | Capacité | 50 μ F |
| | Résistance d'amortissement | 0 Ω |
| Puissance active de retirance | | 10Kw |
| Puissance réactive de refinance | | 5KVar |
| Contrôle De courant | Gain Proportionnel | 1 |
| | Gain Intégrateur | 460 |
| | Gain Proportionnel | 1 |
| | Gain Intégrateur | 460 |
| PLL | Gain Proportionnel | 2.1 |
| | Gain Intégrateur | 5000 |

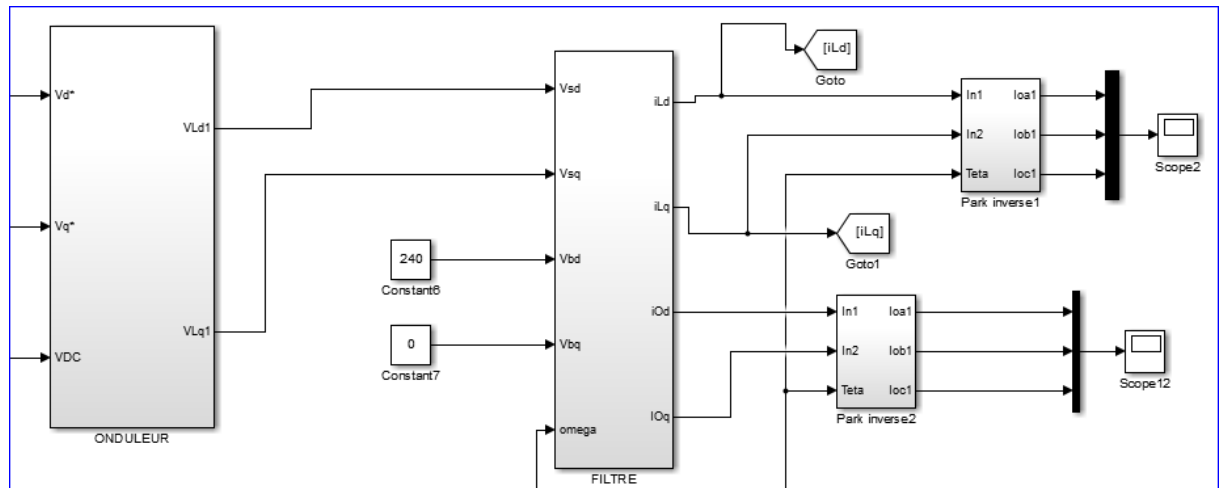
2) Le montage global de simulation et le Zoom de ses différentes parties



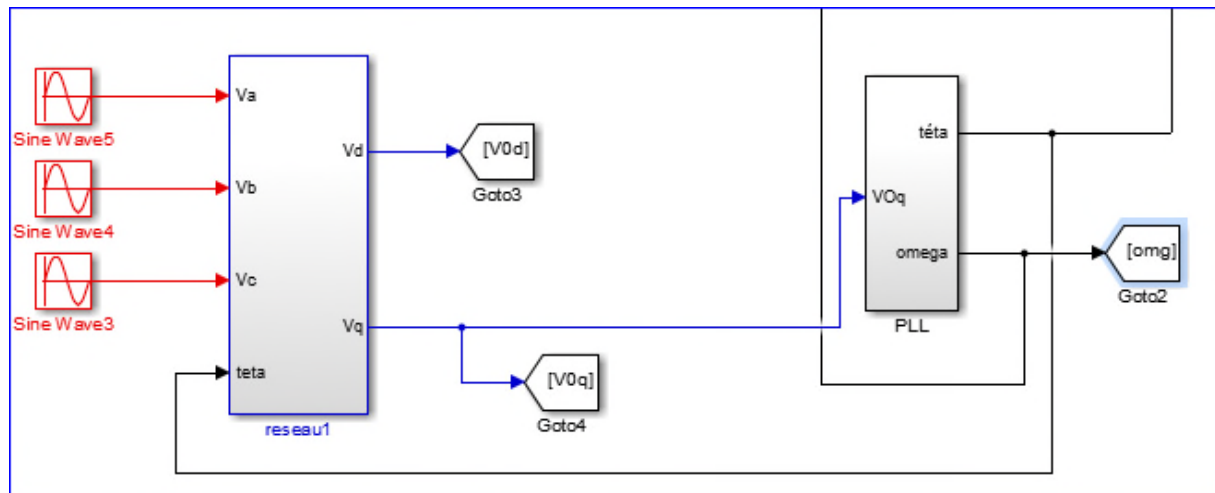
Le montage global



Zoom du power controleur avec le curent controleur



Zoom de l'onduleur et le filtre avec les deux Park (inverse)



Zoom de réseau principal et le PLL