

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

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique

Département D'Electrotechnique

## **Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

*Présenté par*

**AIT SIDHOUM Nacira**

### **Thème**

# **Etude d'un onduleur monophasé : Application aux systèmes photovoltaïques**

*Mémoire soutenu publiquement le 30/12/2019 devant le jury composé de :*

**Mr. BECHOUCHE Ali**  
MC/A, UMMTO, Président

**Mr. SEDDIKI Hamid**  
Professeur, UMMTO, Encadreur

**Mr. RAHOUI Adel**  
MA/B, ENSTP Alger, Examineur

**2018-2019**

# Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Je remercie vivement Monsieur **Hamid SEDDIKI**, pour l'honneur qu'il m'a fait en encadrement, et son entière disponibilité durant toutes les étapes de ce projet.

J'exprime mes remerciements à Monsieur **Ali BECHOUCHE** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur **Adel RAHOU** membre du jury, pour sa disponibilité. Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département d'électrotechnique pour leurs conseils.

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les Protège  
pour leurs soutien moral, pour Leurs encouragements et les

Sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes chères frères et sœurs

A toutes ma famille

A mes collègues de travail et toute l'équipe de la métrologie

Légale de la wilaya de Tizi ousou.

A ma meilleure amie ZAHIA

# Sommaire

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

## **Chapitre I : Etat de l'art des systèmes à énergies renouvelables**

I.1 Introduction.....	3
I.2. Différents types d'énergies renouvelables.....	3
I.2.1. Energie hydroélectrique.....	3
I.2.2. Energie de Biomasse.....	4
I.2.3. Energie de la géothermie.....	4
I.2.4. L'énergie solaire.....	5
I.2.4.1. L'énergie solaire thermique.....	5
I.2.4.2. L'énergie solaire photovoltaïque.....	6
I.2.5. Energie éolienne.....	6
I.2.6. Conclusion.....	7

## **Chapitre II : La conversion photovoltaïque**

II.1. Introduction.....	8
II.2. Cellule photovoltaïque :.....	8
II.2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule PV :.....	8
II.2.2 Types de cellules photovoltaïques (PV) :.....	9
II.3. Module photovoltaïque :.....	11
II.4 Panneau photovoltaïque :.....	13
II.5. Système photovoltaïque :.....	14
II.6. Avantages et inconvénients	

## **Chapitre III: Onduleur monophasé pour la conversion continu-alternatif**

III.1 Introduction.....	19
III.2. Généralités et principe de fonctionnement.....	19
III.3. Principe de fonctionnement.....	19
III.4. Commande de l'onduleur.....	20
III.4.1. Commande par hystérésis :.....	20
III.4.2 Commande MLI.....	20
III.5. Système de filtrage.....	21
III.5.1.Filtre passe- bas $LC$ .....	22
III-5-2. Dimensionnement du filtre :.....	23

III.6.Modélisation de l'onduleur monophasé.....	23
III.7. Etude du système avec une résistance d'amortissement R .....	27
III.8.Etude du système perturbé : .....	31
III.9.Conclusion.....	33

#### **Chapitre IV: Amortissement virtuel et régulation de la tension**

IV.1.Introduction.....	34
IV.2. Amortissement avec une résistance réelle .....	34
IV.3. Amortissement virtuel.....	38
IV.4.comparaison des résultats des deux méthodes d'amortissement .....	40
IV.5.Système de régulation.....	45
IV.6.Régulateur proportionnel-intégral (PI).....	45
IV.7.Conclusion.....	49

#### **Chapitre V: Commande dans le référentiel (d,q)**

V.1.Introduction .....	50
V.2.Stratégie de commande (DQ) .....	50
V.3.Système de modélisation .....	50
V.4.Commande de l'onduleur.....	56
V.4.1. Boucle de régulation des courants continus.....	56
V.4.2. Boucle de régulation des tensions continues .....	58
V.5.Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	65
Bibliographie .....	67

## Liste des figures

### Chapitre I : Etat de l'art des systèmes à énergies renouvelables

Figure. I.1. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.....	3
Figure. I. 2. Bilan de cycle biomasse. ....	4
Figure. I. 3. Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique. ....	5
Figure. I. 4. Panneau photovoltaïque. ....	6
Figure. I. 5. Ferme éolienne on shore et offshore.. ....	6

### Chapitre II : La conversion photovoltaïque

Figure. II.1. Structure d'une cellule photovoltaïque.....	8
Figure. II.2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure. II.3. Types de Cellules photovoltaïques.....	10
Figure. II.4. Module photovoltaïque.....	11
Figure. II.5. Association de n cellules PV en parallèle et m en série.....	12
Figure. II.6.Caractéristiques de n cellules solaires photovoltaïques en parallèle et m en série .....	12
Figure. II.7. Panneaux photovoltaïques.....	13
Figure. II.8. Composants d'un champ de modules photovoltaïques.....	13
Figure. II.9.Schéma d'un système photovoltaïque.....	14
Figure. II.10. Système photovoltaïque autonome.....	15
Figure. II.11. Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	16
Figure. II.12. Système hybride PV-Eolienne.....	17

### Chapitre III : Onduleur monophasé pour la conversion continu-alternatif

Figure.III.1 .Schéma du principe de la conversion DC-AC.....	19
Figure.III.2 .Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	21
Figure .III.3. Circuit de base d'un filtre passe bas $LC$ .....	22
Figure.III.4 .Schéma de modélisation d'un onduleur monophasé avec un filtre $LC$ .....	24

<b>Figure.III.5</b> .Allure du courant $I$ à la sortie de l'onduleur.....	26
<b>Figure.III.6</b> .Allure du courant de charge $I_L$ .....	26
<b>Figure.III.7</b> .Allure de la tension à la sortie de l'onduleur $V_i$ .....	26
<b>Figure.III.8</b> .Allure de la tension de charge $V_L$ .....	27
<b>Figure.III.9</b> .Allure de la tension à la sortie de l'onduleur $V_i$ et la tension de charge $V_L$ .....	27
<b>Figure.III.10</b> .Schéma de modélisation d'un onduleur monophasé avec un filtre LC et une Résistance d'amortissement $R$ .....	29
<b>Figure.III.11</b> .Allure du courant $I$ à la sortie de l'onduleur .....	29
<b>Figure.III.12</b> .Allure du courant de charge $I_L$ .....	30
<b>Figure.III.13</b> .Allure de la tension à la sortie de l'onduleur $V_i$ .....	30
<b>Figure.III.14</b> .Allure de la tension de charge $V_L$ .....	31
<b>Figure.III.15</b> .schéma de simulation du système perturbé.....	31
<b>Figure.III.16</b> .Allure de la tension $V_i$ en sortie de l'onduleur .....	32
<b>Figure.III.17</b> .Allure de la tension de charge $V_L$ .....	32
<b>Figure.III.18</b> .Allure du courant $I$ à la sortie de l'onduleur .....	32

## **Chapitre IV : Amortissement virtuel et régulation de la tension**

<b>Figure.IV.1</b> .Schéma du système avec une résistance d'amortissement réel.....	34
<b>Figure.IV.2</b> .Schéma d'implémentation de la résistance réelle.....	35
<b>Figure.IV.3</b> .Allure de la tension de charge $V_L$ réelle.....	36
<b>Figure. IV.4</b> .Allure du courant $I$ réel.....	36
<b>Figure. IV.5</b> .Allure de la tension de charge $V_L$ .....	37
<b>Figure. IV.6</b> .Allure du courant $I$ .....	37
<b>Figure. IV.7</b> .Schéma d'implémentation de la résistance virtuelle.....	38
<b>Figure. IV.8</b> .Allure de la tension virtuelle $V_L$ .....	39
<b>Figure. IV.9</b> .Allure du courant $I$ virtuel.....	39
<b>Figure. IV.10</b> .Allure de la tension virtuelle $V_L$ .....	40
<b>Figure. IV.11</b> .Allure du courant $I$ virtuel.....	40
<b>Figure. IV. 12</b> .Allure des courants $I$ réel et $I$ virtuel.....	41
<b>Figure. IV.13</b> .Allures des tensions de charge $V_L$ réelle et virtuelle.....	41
<b>Figure. IV.14</b> .Allures des tensions de charge $V_L$ réelle et virtuelle.....	42
<b>Figure. IV. 15</b> .Allure des courants $I$ réel et $I$ virtuel.....	42

<b>Figure.IV.16.</b> Allure de la tension de charge $V_L$ réelle et virtuelle.....	43
<b>Figure.IV.17.</b> Allure du courant I réel et virtuel.....	43
<b>Figure.IV.18.</b> Allure de la tension de charge $V_L$ réelle et virtuelle.....	43
<b>Figure. IV.19.</b> Allure des courants I réel et virtuel.....	44
<b>Figure.IV.20.</b> Système incluant un contrôleur PI.....	44
<b>Figure. IV.21.</b> Schéma d'implémentation du régulateur PI.....	45
<b>Figure. IV.22.</b> Allure de la tension d'entrée $V_i$ et la tension de sortie $V_L$ .....	46
<b>Figure. IV.23.</b> déphasage entre la tension d'entrée $V_i$ et la tension de sortie $V_L$ .....	47
<b>Figure. IV.24.</b> Allure du courant d'entrée $I$ et le courant de charge $I_L$ .....	47
<b>Figure. IV.25.</b> Allure de la tension d'entrée $V_i$ et la tension de sortie $V_L$ .....	47

## Chapitre V : Commande dans le référentiel DQ

<b>Figure.V.1.</b> Schéma de l'onduleur avec un filtre LCR.....	50
<b>Figure.V.2.</b> Diagramme vectoriel du repère fixe et tournant ( $\alpha\beta$ -dq).....	51
<b>Figure.V.3.</b> Schéma d'implémentation des composantes ( $\alpha \beta$ ) sous Matlab Simulink.....	52
<b>Figure.V.4.</b> Allure des tensions $V_\alpha$ et $V_\beta$ .....	53
<b>Figure.V.5.</b> Schéma de la boucle des courants.....	55
<b>Figure.V.6.</b> Schéma de la boucle des tensions.....	57
<b>Figure. V.7.</b> Schéma Simulink pour la regulation des courants et des tensions.....	58
<b>Figure.V.8.</b> Schéma de simulation pour l'obtention des composantes des courants et des tensions dans le plan (d,q) sous Matlab simulink.....	59
<b>Figure.V.9.</b> Allure de la tension $V_d$ .....	60
<b>Figure.V.10.</b> Allure de la tension $V_q$ .....	60
<b>Figure.V.11.</b> Allure du courant $I_d$ .....	60
<b>Figure.V.12.</b> Allure du courant $I_q$ .....	62
<b>Figure.V.13.</b> Allure du courant $I_{Ld}$ .....	61
<b>Figure.V.14.</b> Allure du courant $I_{Lq}$ .....	61

## Liste des symboles

**PV**: Photovoltaïque.

**GPV**: Générateur Photovoltaïque.

**MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsion

**M<sub>R</sub>** : Le coefficient de réglage

**V<sub>p</sub>** : Amplitude de l'onde porteuse

**V<sub>m</sub>** : Amplitude de l'onde modulante

**M<sub>I</sub>** : Indice de modulation

**F<sub>p</sub>** : Fréquence de l'onde porteuse

**F<sub>m</sub>** : Fréquence de l'onde modulante

**L** : Inductance du filtre

**C** : Capacité du filtre

**R<sub>L</sub>** : Résistance de la charge

**V<sub>i</sub>** : Tension de sortie de l'onduleur

**V<sub>L</sub>** : Tension de la charge

**F<sub>c</sub>** : Fréquence de coupure du filtre

**F<sub>d</sub>** : Fréquence de découpage du filtre

$\Delta I_{ond}$  : Ondulation du courant de l'onduleur

**V<sub>bus</sub>** : Tension du bus continu

$\Delta V_i$  : Ondulation de la tension de l'onduleur

**IGBT** : Insulated gate bipolar transistor (transistor bipolaire)

**V<sub>dc</sub>** : Tension du générateur photovoltaïque

**I<sub>L</sub>** : courant de charge

**T** : Période d'oscillations

$\lambda$  : Coefficient d'amortissement

$\omega_0$  : Pulsation propre du circuit

**PI** : Régulateur proportionnel intégral

**DQ** : le référentiel tournant (Direct quadrature)

**K<sub>i</sub>** : Gain du régulateur de la boucle des courants

**K<sub>v</sub>** : Gain du régulateur de la boucle des tensions

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Pour remédier aux problèmes de l'épuisement progressif des combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) et les émissions des gaz à effet de serre la production de l'énergie électrique par des moyens propres (non polluants) est devenue d'une nécessité primordiale. L'électricité renouvelable, aussi appelée électricité verte est produite uniquement à partir des sources d'énergie renouvelables. [1]

L'intégration de la filière solaire sous forme de systèmes photovoltaïques autonomes répond d'une manière parfaite à grand nombre d'applications comme l'électrification des habitats ruraux, l'éclairage, les télécommunications... etc. Ces structures doivent, tout autant que les structures conventionnelles, maintenir une tension alternative de haute qualité au point commun de connexion avec les charges. [2]

La problématique de contrôle de ces structures, renvoie à celle du contrôle des convertisseurs de puissances qu'elles emploient. Ainsi le contrôle en tension des onduleurs dédiés à la génération distribuée d'électricité bénéficie d'un ensemble de travaux de recherche. Plusieurs stratégies de commandes sont proposées dans la littérature dans le but commun de maintenir la tension de sortie des onduleurs à des niveaux satisfaisants [3].

Dans ce contexte, le travail développé au cours de ce mémoire a pour objectif d'apporter des solutions visant l'amélioration des performances et la qualité de la tension de sortie d'un onduleur monophasé destiné aux applications photovoltaïques autonome en présence d'une charge linéaire.

Pour atteindre ces objectifs, on a partagé ce travail en cinq chapitres :

Le premier chapitre expose les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, nous focalisons notre attention sur l'énergie solaire photovoltaïque.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque et le principe de la conversion, les éléments composant le système photovoltaïque (cellules, modules, panneaux...) ainsi que les différents types de systèmes.

Dans le troisième chapitre d'abord, on présente des généralités sur l'onduleur monophasé autonome, son principe de fonctionnement, les différentes techniques de commande et le système de filtrage, ensuite afin d'étudier la qualité de la tension de sortie du

Le système on passe à la modélisation et simulation sous MATLAB SIMULINK de l'ensemble onduleur-filtre LC dans un premier temps, puis onduleur-filtre LC et une résistance d'amortissement dans un deuxième temps, enfin on étudie le système perturbé. Les résultats obtenus et leur interprétation sont donnés après chaque étape.

Le quatrième chapitre étudie et compare deux méthodes d'amortissement réelle et virtuelle et propose un système de régulation afin d'améliorer la qualité de la tension de sortie du système.

Le cinquième chapitre propose une stratégie de commande de l'onduleur dans le référentiel DQ son implémentation sur MATLAB SIMULINK et les résultats obtenus sont présentés.

En fin, nous terminerons par une conclusion générale où nous discuterons les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.

# Chapitre I

*Etat de l'art des systèmes à  
Energies renouvelables*

## I.1 Introduction

L'épuisement proche des ressources énergétiques fossiles ainsi que les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, incitent au développement des énergies renouvelables. Une source d'énergie est renouvelable, si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce qui n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires. [4]

## I.2. Différents types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ont plusieurs ressources. On se limite à cinq ressources fondamentales selon l'importance.

### I.2.1. Energie hydroélectrique

Rappelons d'abord que l'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus mature et la plus développée. L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques. La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine. [5]

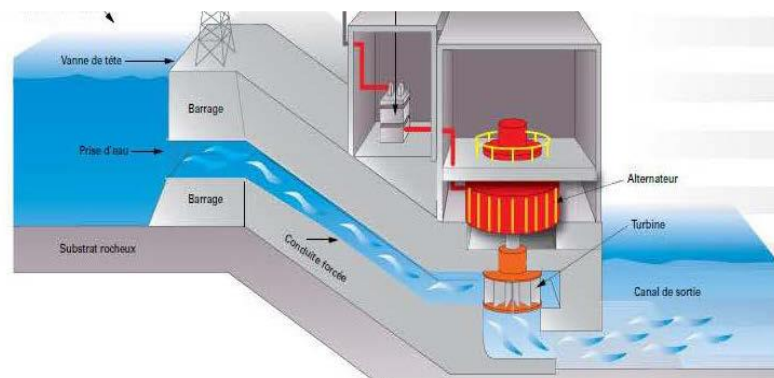


Figure. I.1. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique [5].

Le principal avantage énergétique de cette énergie est qu'elle n'est pas intermittente. La technologie nécessaire à son utilisation est maîtrisée, les coûts de maintenance sont raisonnables, Les installations sont prévues pour fonctionner longtemps.

Cependant le coût de réalisation, le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations lourdes, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients. [6]

### I.2.2. Energie de Biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. [6] La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé source d'énergie

La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites.

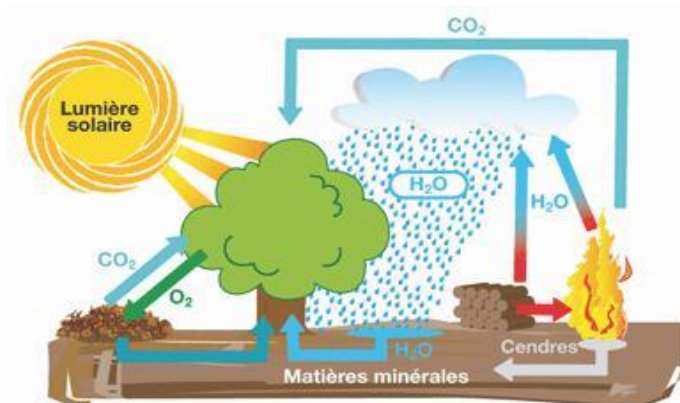


Figure. I.2. Bilan de cycle biomasse [7].

### I.2.3. Energie de la géothermie

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

Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure. Le principe d'utilisation de la géothermie pour générer l'électricité est présenté sur la figure. I.3

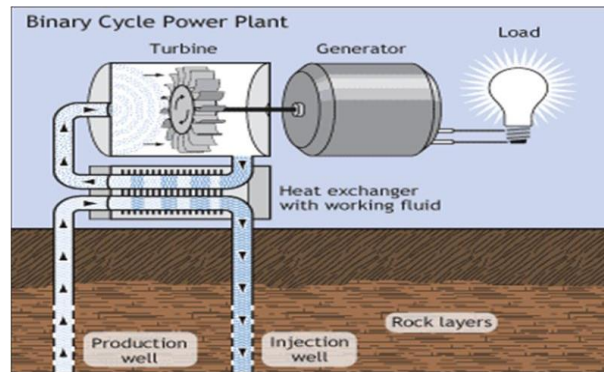


Figure. I.3. Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique [8]

#### I.2.4. L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kw/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [9].

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

##### I.2.4.1. L'énergie solaire thermique

Elle consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

### I.2.4.2. L'énergie solaire photovoltaïque

Elle consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.



Figure I.4. Panneau photovoltaïque

### I.2.5. Energie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre – « on shore » ou dans la mer « Offshore ».

Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le « offshore » mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté et les impacts pour les oiseaux. [10]



Figure. I.5. Ferme éolienne on shore et offshore.[9]

**I.2.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons énoncé, de manière générale, les différentes ressources énergétiques permettant de produire de la chaleur et de l'électricité par sources d'énergie renouvelables. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque. Nous détaillerons dans ce qui suit les éléments ayant trait à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

## *Chapitre II*

### *La conversion photovoltaïque*

## II.1. Introduction

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre. On peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité à travers des modules photovoltaïques composés de cellules solaires.

Le mot « photovoltaïque » vient du mot grec « photos » qui signifie lumière et du mot « Volta » qui est le nom du physicien italien « Alessandro Volta » qui, en 1800, découvrit la pile électrique. C'est « Alexandre Edmond Becquerel » qui découvrit le principe de la conversion de la lumière en électricité en 1839. Il avait observé que certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. De là, il démontra qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité. [11]

## II.2. Cellule photovoltaïque :

### II.2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule PV :

Une cellule photovoltaïque est un composant optoélectronique qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique.

La structure la plus simple de ce dispositif est assimilable à une diode photosensible basée sur des matériaux semi-conducteurs qui exploite l'effet photovoltaïque, un phénomène physique propre à certains de ces matériaux, pour la transformation de l'énergie. La figure.II.1 représente la structure d'une cellule photovoltaïque. [12]

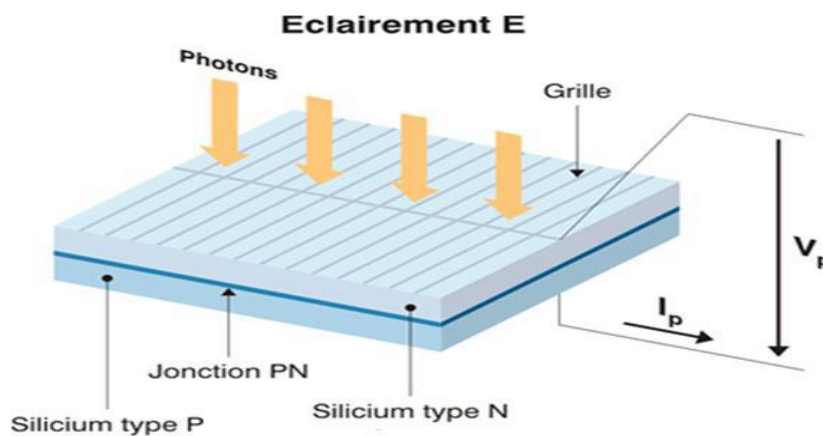


Figure. II.1. Structure d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont excités par les photons constituant la lumière, sous l'action de cette excitation, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés". Ce principe est illustré sur la figure (II.2)

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique, sinon les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible qui varie entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule. [11]

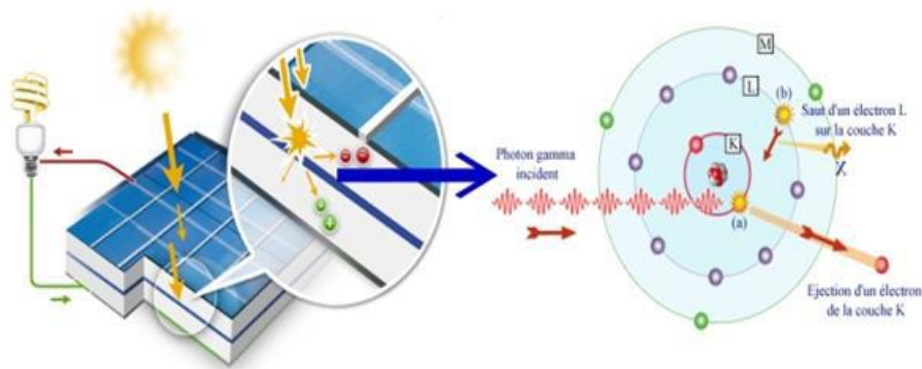


Figure. II.2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Afin d'effectuer la collecte du courant électrique, des électrodes en forme de grille sont déposés sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure permet le passage du rayon lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbé. [12]

### II.2.2. Types de cellules photovoltaïques (PV) :

Il existe plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire. En dehors du prix, le choix d'un type de cellule n'a que peu de conséquences pour l'utilisateur, la principale différence sera la surface qui, à puissance égale, pourra varier du simple au double. [13]

**➤ Cellules au silicium monocristallin :**

Les cellules au silicium monocristallin illustrées sur la figure 2.3 offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 16 à 19%.

Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite on obtient une puissance de 120 à 190 Wc /m<sup>2</sup>. [13]

**➤ Cellules au silicium poly cristallin (ou multi cristallin) :**

Les cellules au silicium poly cristallin ont en général un rendement compris entre 12 et 14% [7]. Il faut environ 8m<sup>2</sup> de cellules pour obtenir 1kWc. Ces cellules sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin, Les cellules poly cristallines sont reconnaissables aux formes irrégulières des cristaux qui apparaissent nettement à l'œil nu. [13]

**➤ Cellules au silicium amorphe**

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées avec un gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté ensuite sur différents supports comme des plaques de verre, du plastique souple ou encore du métal, via un procédé de vaporisation sous vide. Les cellules sont de couleur gris foncé.

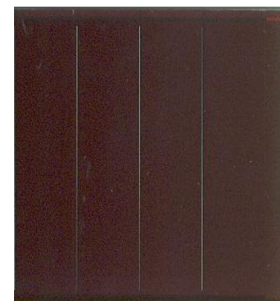
Il s'agit d'un type de cellule bon marché, que l'on retrouve dans la plupart des objets du quotidien fonctionnant à l'énergie solaire (calculatrice et montre solaire par exemple). Cette technologie est pratiquée car utilisable sur de nombreux supports et elle peut fonctionner si faible ensoleillement. Cependant ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m<sup>2</sup> pour obtenir 1kWc). [14]



a) Cellule monocristallin



b) Cellule poly cristallin



c) Cellule amorphe

Figure .II.3. Types de Cellules photovoltaïques

➤ **Cellules utilisant d'autres matériaux que le silicium :**

Ce sont également des cellules à couches minces, elles peuvent être fabriquées à partir de matériaux divers : di séléniure de cuivre et d'iridium (CIS), tellurure de cadmium (CdTe)..., Elles ont des rendements compris entre 7 et 11%. [13]

### II.3. Module photovoltaïque :

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Pour obtenir des niveaux de puissances compatibles avec le matériel usuel de telles cellules sont associées formant ainsi des modules PV, comme on peut le voir sur la figure 2.6. [15]

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène - vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière de polyéthylène. [12]

Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques Watts crête et quelques dizaines de Watts crête (1m<sup>2</sup> de cellules PV produit de l'ordre de 100W). Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle plusieurs modules pour former un panneau photovoltaïque (champ photovoltaïque). [12]

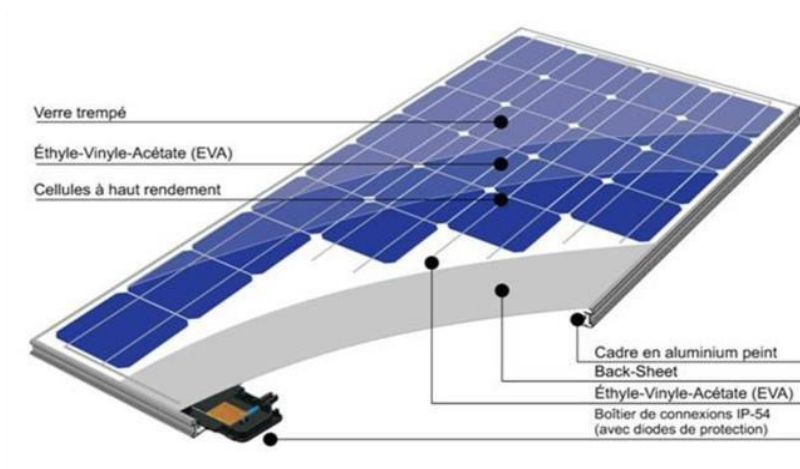


Figure .II.4. Module photovoltaïque.

Un groupement mixte formé par la mise en série de (m) cellules en série et de (n) cellules en parallèle est illustré dans la figure(II.5).

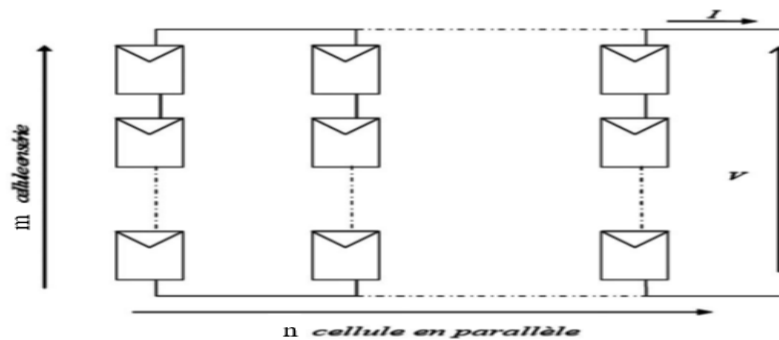


Figure .II.5. Association de n cellules PV en parallèle et m en série.

La courbe de fonctionnement I-V d'un module de base est une courbe se déduisant de la courbe de fonctionnement d'une cellule élémentaire est représenté sur la figure(II.6). [15]

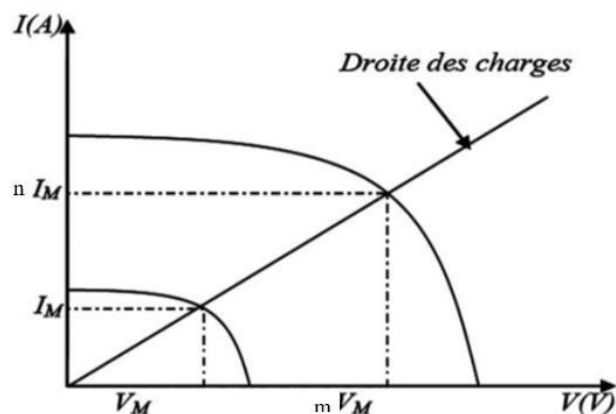


Figure .II.6.Caractéristiques de n cellules solaires en parallèle et m en série.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- ✓ Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- ✓ Protection mécanique et support.
- ✓ Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur. [16]

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre. [12]

#### II.4. Panneau photovoltaïque :

Le panneau PV se compose de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement et température. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [17]

L'orientation plein Sud des modules permet de capter un maximum de lumière au cours de la journée et résulte en un pic de production autour de midi. L'inclinaison joue un rôle très important pour attirer le maximum de flux solaire, les expériences ont montré qu'il suffit d'incliner le module d'un angle de 30 degrés pour obtenir un meilleur rendement. [18]

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie. [12-16]



Figure .II.7.Panneaux photovoltaïques.

La figure. II.8 représente les différents composants d'un champ photovoltaïque :

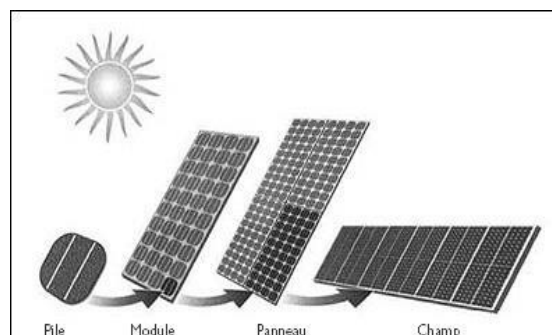


Figure .II.8. Composants d'un champ de modules photovoltaïques.

## II.5. Système photovoltaïque :

On ne peut pas considérer les modules photovoltaïques comme simples générateurs d'énergie électrique en remplacement d'un réseau, mais associer étroitement ces modules à plusieurs composants afin de former un système photovoltaïque complet pour une application bien spécifique correspondant à un besoin défini. La figure(II.9) montre la structure d'un système PV. [19]

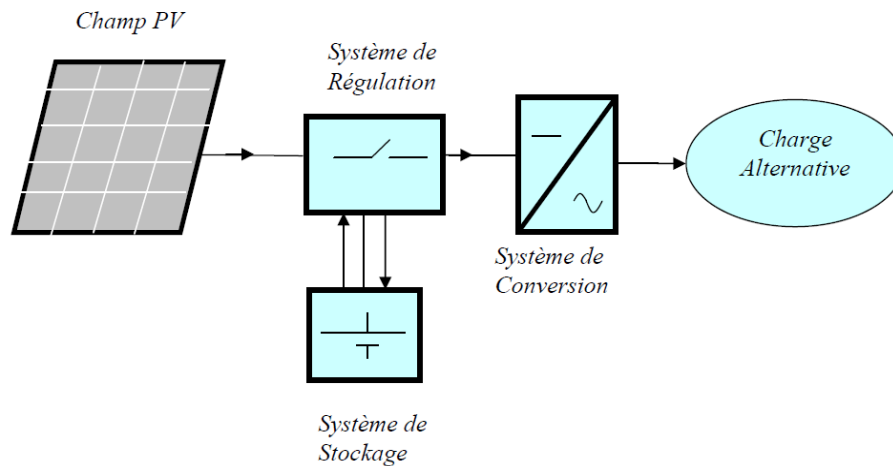


Figure .II.9. Schéma d'un système photovoltaïque.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés selon les exigences sont de trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride. [18]

### II.5.1. Systèmes photovoltaïque autonomes :

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système PV est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments figure(II.10) [17]

- ✓ Un ou plusieurs modules PV.
- ✓ Le système de régulation.
- ✓ Une ou plusieurs batteries.
- ✓ L'onduleur

L'énergie produite est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif. [20]

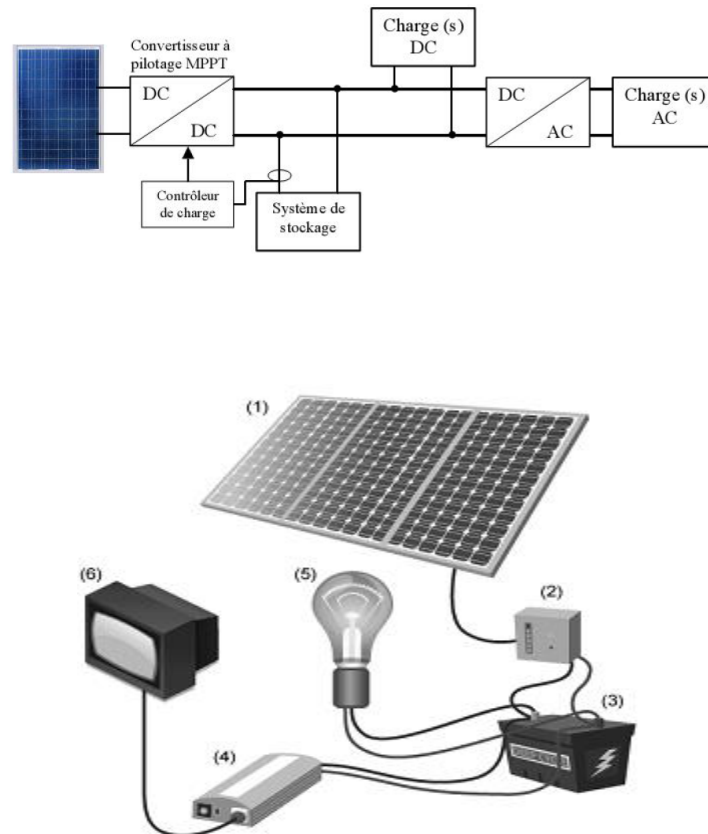


Figure .II.10. Système photovoltaïque autonome.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits. [20]

### II.5.2. Système photovoltaïque raccordé à un réseau :

Non autonome ou « grid connected », le système peut également être connecté au réseau, la figure(II.11) montre une configuration de ce système. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique de stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne

de ce dernier rend non opérationnel le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins. [20]

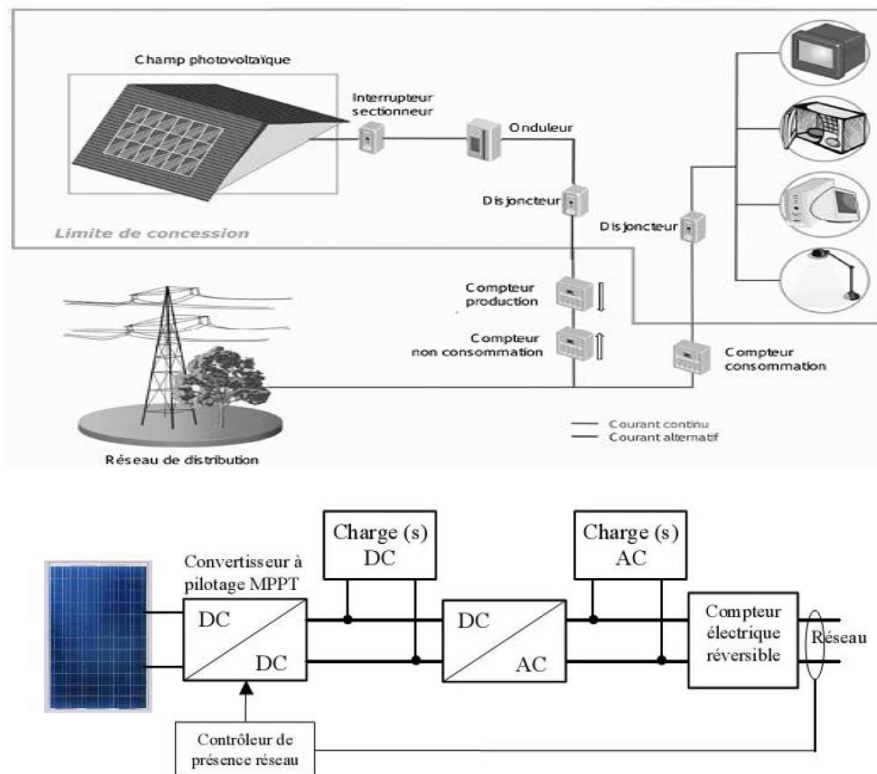


Figure. II.11. Système photovoltaïque raccordé au réseau.

### II.5.3. Système photovoltaïque hybride :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie (voir figure(II.12)). Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée. [18]

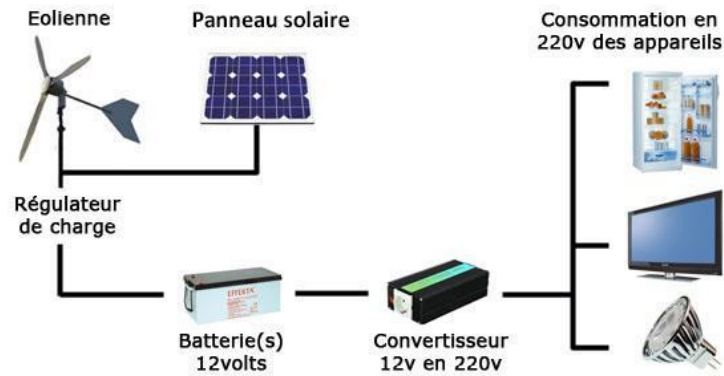


Figure .II.12. Système hybride PV-Eolienne.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés. [18]

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères : simplicité, application, environnement, etc... Toutefois l'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge constituée, soit d'une batterie, d'une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules solaires. [19]

## II.6. Avantages et inconvénients de l'énergie PV :

### -Avantages :

- ✓ Elle est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.
- ✓ Haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- ✓ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milli Watt au Méga Watt.
- ✓ Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte (facteurs atmosphériques ou liquides, produits de nettoyage, risque d'accident physique, ...) aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est une énergie purement propre et écologique.

- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- ✓ Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.

**-Inconvénients :**

- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % [19] avec une limite théorique pour une cellule de 28% [19]. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Sensible conditions météorologiques.
- ✓ L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer.

**II.7. Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté les différents composants constituant un système photovoltaïque. On a commencé par la cellule et le principe de la conversion, ensuite on a vu que le module est constitué d'un ensemble de cellules, puis plusieurs modules forme un panneau et enfin un champ est un ensemble de panneaux.

On a vu aussi les différents systèmes photovoltaïques, à savoir les systèmes connectés au réseau, hybrides et autonomes, et les principaux éléments les constituant. Enfin on a cité les avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïques.

Dans le chapitre suivant nous étudierons l'onduleur monophasé destiné aux systèmes photovoltaïques autonomes, son principe de fonctionnement et sa commande seront abordés.

# **Chapitre III**

**Onduleur monophasé**

**Pour la conversion**

**Continu-alternatif**

### III.1 Introduction

L'énergie produite par les GPV étant continue, il est nécessaire de la convertir en alternatif afin de satisfaire l'alimentation des charges, cette conversion est assurée par l'onduleur.

Dans ce chapitre, nous allons étudier un onduleur monophasé destiné pour une application photovoltaïque autonome.

### III.2. Généralités et principe de fonctionnement

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative. En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande des semi-conducteurs. Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [15].

La figure (III.1) représente un schéma de principe de la conversion continu-alternatif :

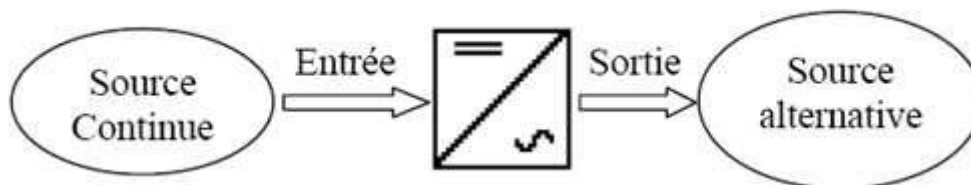


Figure.III.1 .Schéma du principe de la conversion DC-AC

### III.3. Principe de fonctionnement

L'énergie à l'entrée de l'onduleur étant continue et celle en sortie alternative, cela laisse voir que son principe de fonctionnement est basé sur la commutation. Cette commutation est réalisée grâce à des interrupteurs qui commutent de façon alternative.

Les onduleurs ont le même principe lorsqu'ils fonctionnent, mais ceux des systèmes photovoltaïques diffèrent un peu des autres onduleurs d'électronique de puissance.

L'objectif principal de l'onduleur photovoltaïque est la recherche du point de puissance maximale.

Dans le cas où le système est autonome, l'onduleur est dit autonome et dans le cas où le système est connecté au réseau, l'onduleur est dit assisté.

#### **III.4. Commande de l'onduleur**

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées: [30]

- commande par hystérésis
- commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

##### **III.4.1. Commande par hystérésis :**

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation. En pratique, on utilise La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur [30]

##### **III.4.2 Commande MLI**

La modulation à largeur d'impulsion est utilisée pour créer des signaux de déclenchement pour les quatre interrupteurs de l'onduleur de façon appropriée. En effet, dans un onduleur, les commutateurs doivent être commandés dans une certaine séquence pour créer une tension de sortie sinusoïdale. Ainsi, une forme d'onde de référence est requise et est appelée : signal de modulation (ou de commande). Ce signal est comparé à une porteuse, généralement de forme triangulaire, qui contrôle la fréquence de commutation tandis que le signal de référence contrôle l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie [10].

Il existe deux méthodes de modulation, la modulation unipolaire et la modulation bipolaire. Pour la modulation unipolaire, la tension de sortie de l'onduleur  $V_{inverter}$  passe de  $+v_{dc}$  à 0 ou de  $-v_{dc}$  à 0. Pour la modulation bipolaire, la tension de sortie  $V_{inverter}$  est soit  $+v_{dc}$  ou

- $v_{dc}$ . En effet, lorsque le signal de référence est plus grand que la porteuse, les interrupteurs 1 et 4 (haut gauche et bas droit en Figure (III-2) sont actifs et lorsque le signal de référence est plus petit que la porteuse alors ce sont les interrupteurs 3 et 2 (haut droite et bas gauche, en Figure (III-2) La modulation unipolaire a l'avantage d'être facilement implémentable, mais elle génère plus d'harmoniques indésirables qu'une modulation bipolaire [11]. Ainsi pour améliorer le contenu harmonique nous choisissons une modulation à largeur d'impulsion bipolaire pour la commande de l'onduleur.

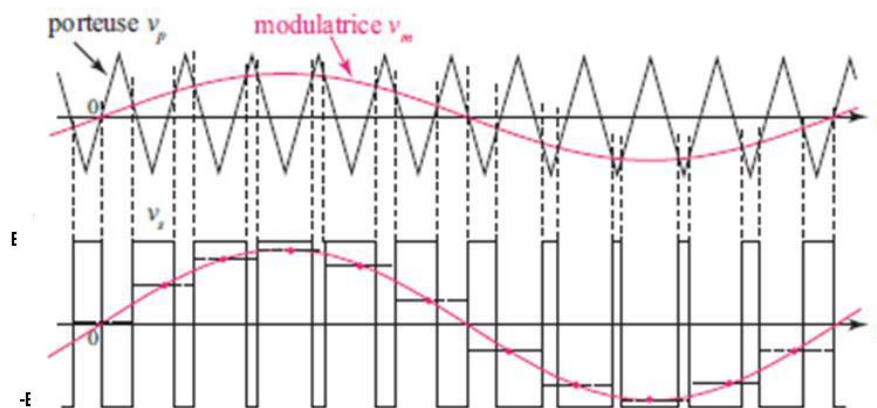


Figure.III.2 .Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

### III.4.3. Caractéristiques de la modulation

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

- **Le coefficient de réglage** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion

$$M_R = \frac{V_m}{V_p}$$

- **L'indice de modulation** : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante [22].

$$M_I = \frac{f_p}{f_m}$$

### III.5. Système de filtrage

La tension et/ou le courant de sortie des convertisseurs DC-AC contient un nombre important d'harmoniques multiples de la fréquence de commutation des bras d'interrupteurs. Ainsi, et afin de satisfaire les exigences liées aux charges, l'utilisation d'un filtre passe-bas en sortie devient primordiale pour éliminer les harmoniques de hautes fréquences qu'impose la commutation des interrupteurs de puissance.

#### III.5.1. Filtre passe-bas $LC$

Les filtres passe-bas du second ordre représentent une grande part des filtres présents dans les systèmes de génération distribuée d'électricité, essentiellement les systèmes autonomes. Ces filtres, dont le circuit de base est illustré par la figure. III.3, sont constitués de la connexion d'une bobine d'inductance  $L$  et d'un condensateur de capacité  $C$  en plus des résistances équivalentes respectives à chaque élément. Cette disposition permet d'éliminer efficacement les harmoniques dues à la commutation des interrupteurs de puissance. [3]

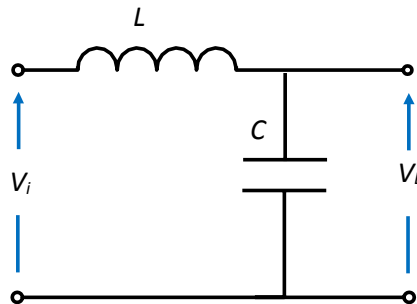


Figure III.3. Circuit de base d'un filtre passe bas  $LC$

La fréquence de coupure qui caractérise ces filtres est donnée par l'équation (III.1).

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{III.1})$$

### III-5-2. Dimensionnement du filtre :

#### ➤ L'inductance

L'inductance  $L$  du filtre transforme l'ensemble "condensateur + onduleur" en source de courant et réalise le lissage du courant onduleur  $I_{ond}$ . L'ondulation (à la fréquence de découpage  $f_d$ ) du courant alternatif onduleur  $\Delta I_{ond}$  est liée à la tension du bus continu  $V_{bus}$  à l'inductance de filtrage  $L$  par la relation suivante [21]

$$\Delta I_{ond} = \frac{V_{bus}}{12 * L * f_d} \quad (III-2)$$

On peut donc trouver l'expression de l'inductance en fonction de cette ondulation :

$$L = \frac{V_{bus}}{4 * \Delta I_{ond} * f_d} \quad (III-3)$$

#### ➤ La capacité :

Au moment des commutations, la tension de sortie de l'onduleur  $V_i$  subit des discontinuités importantes indésirables. Le gradient de tension ( $dV_i/dt$ ) est alors très élevé et génère des surintensités qui affectent le courant. Pour éviter cela, un condensateur de capacité  $C$  est placé à la sortie de l'onduleur.

L'expression nécessaire au calcul de cette capacité du filtre en fonction des ondulations de la tension  $\Delta V_i$  est la suivante [21]

$$C = \frac{\Delta I_{ond}}{8 * f_d * \Delta V_i} \quad (III-4)$$

### III.6- Modélisation de l'onduleur monophasé

Pour notre étude, la topologie de la figure (III.3) est utilisée. Elle se compose de l'onduleur monophasé en pont constitué de quatre IGBT et diodes en antiparallèle. Le filtre LC est utilisé pour filtrer la tension en sortie de l'onduleur et la charge est considérée linéaire.

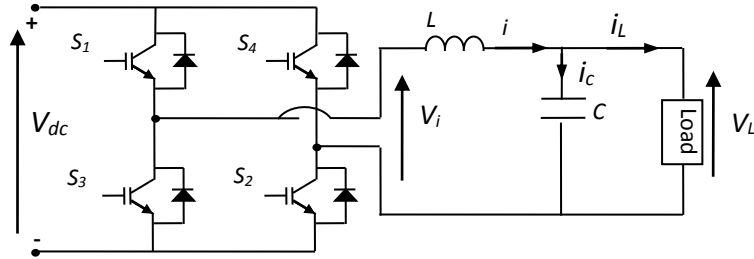


Figure.III.4 .Schéma de modélisation d'un onduleur monophasé avec un filtre LC

Le circuit est régi par les équations suivantes

$$\begin{aligned} v_i &= L \frac{di}{dt} + v_L \\ i &= C \frac{dv_L}{dt} + i_L \end{aligned} \quad (\text{III-5})$$

On considère le fonctionnement à vide  $i_L = 0$

$$\begin{aligned} i &= C \frac{dv_L}{dt} \\ \frac{di}{dt} &= C \frac{d^2 v_L}{dt^2} \\ v_i &= LC \frac{d^2 v_L}{dt^2} + v_L \end{aligned} \quad (\text{III-6})$$

Equation différentielle du second ordre à coefficient constant, sa résolution est la somme de la solution sans second membre et celle avec second membre

L'équation générale sans second membre s'écrit

$$LCr^2 + 1 = 0$$

Avec

$$LC = \frac{1}{\omega_0^2}$$

$$r_1 = \omega_0 (z - j\sqrt{1 - z^2})$$

$$r_2 = \omega_0 (z + j\sqrt{1 - z^2})$$

$$z = 0 \Rightarrow$$

$$r_1 = -j\omega_0$$

$$r_2 = +j\omega_0$$

L'équation avec second membre s'écrit :

$$LCr^2 + 1 = v_i$$

C'est une équation d'un oscillateur harmonique, la solution est une fonction sinusoïdale de la forme suivante :

$$v_L = v_i A \cos\left(\frac{t}{\sqrt{LC}} + \varphi\right) \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Avec } T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

L'expression du courant est de la forme

$$i(t) = K_1 \cos \omega_0 t + K_2 \sin \omega_0 t \quad (\text{III.8})$$

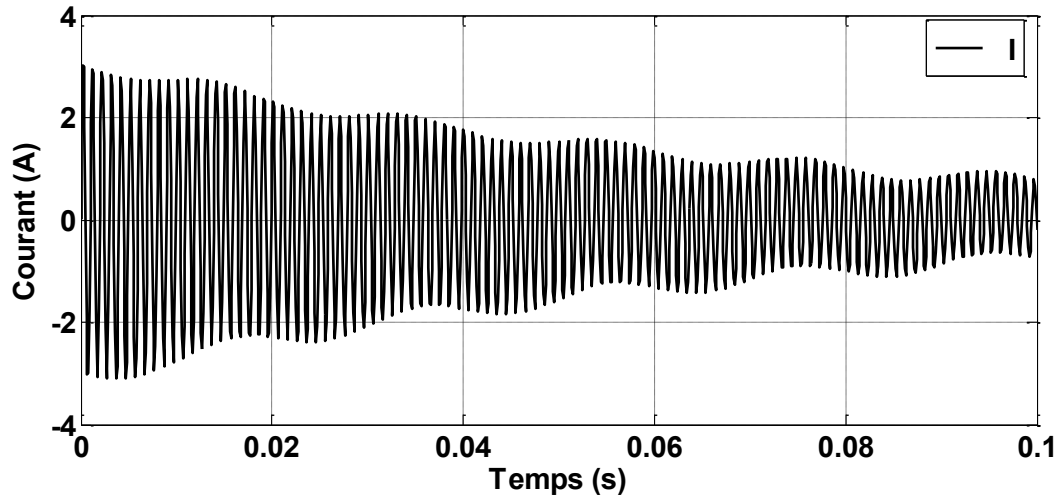
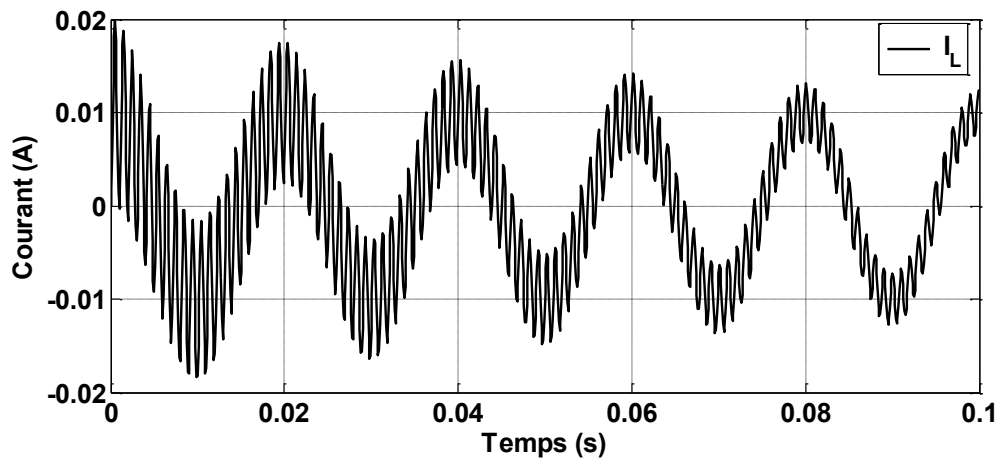
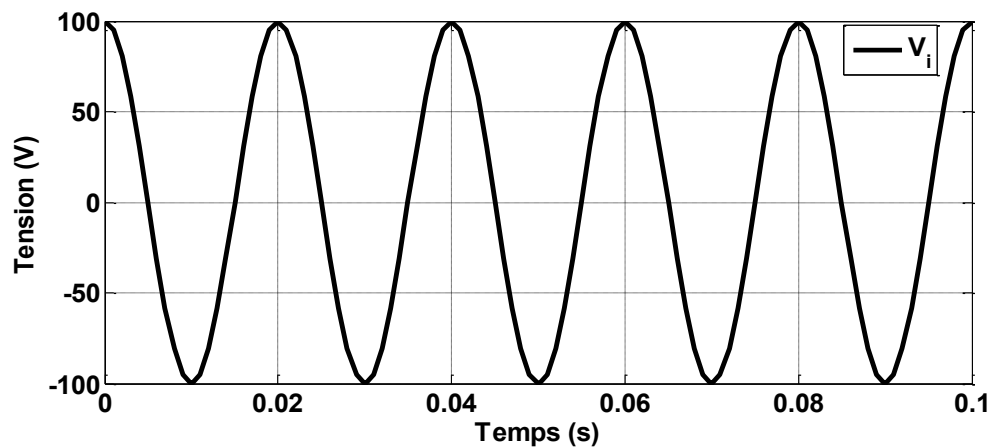
#### ➤ Simulation et résultats

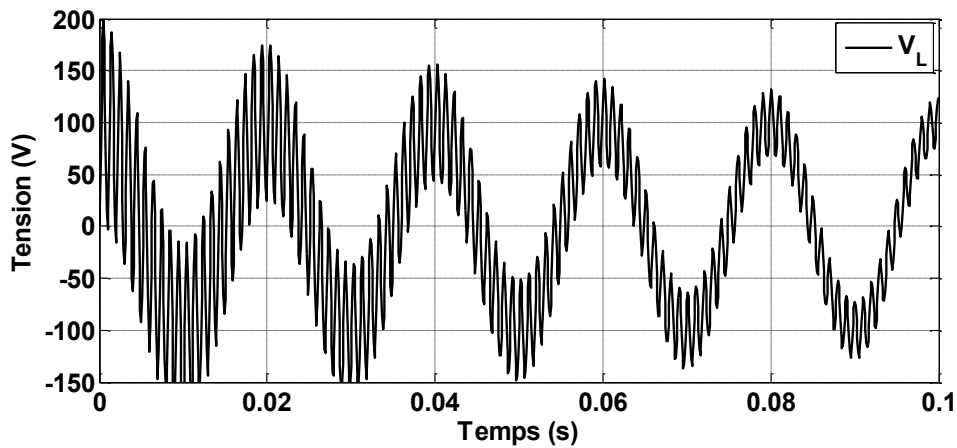
Le système est simulé sous l'environnement MATLAB SIMULINK en utilisant les paramètres du tableau III.1

<i>paramètre</i>	<i>symbole</i>	<i>valeur</i>
<i>Resistance de charge</i>	$R_L$	$1000\Omega$
<i>Inductance du filtre</i>	$L$	$5mH$
<i>Capacité du filtre</i>	$C$	$5\mu F$
<i>Temps de simulation</i>	$t$	$0.2s$

Tableau.III.1.Paramètres de simulation de l'ensemble onduleur-filtre LC

Les figures (III.4), (III.5), (III.6) et(III.7) exposent le comportement de l'onduleur et du filtre LC, en montrant dans l'ordre les allures des courants et des tensions d'entrée et de sortie.

Figure.III.5 .Allure du courant  $I$  en sortie de l'onduleurFigure.III.6 .Allure du courant de charge  $I_L$ Figure.III.7 .Allure de la tension à la sortie de l'onduleur  $V_i$

Figure.III.8 .Allure de la tension de charge  $V_L$ 

### ➤ Interprétation des résultats

On peut constater que :

Le courant est une fonction sinusoïdale du temps. C'est à dire que le régime est purement oscillatoire. L'amortissement est nul, l'exponentielle enveloppe devient une droite horizontale.

La tension de charge est oscillante.

### III.7. Etude du système avec une résistance d'amortissement R

Dans ce qui suit on rajoute au schéma de la figure (III.3) une résistance en série avec le condensateur tel représenté dans la figure (III.8), et on analyse le comportement du système

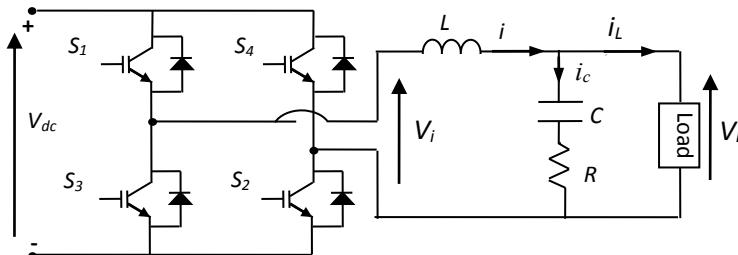


Figure.III.9 .Schéma de modélisation d'un onduleur monophasé avec un filtre  $LC$  et une résistance d'amortissement  $R$

Le circuit est régi par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 v_i &= Ri + L \frac{di}{dt} + v_L \\
 i &= c \frac{dv_c}{dt} = c \frac{d}{dt}(v_L - Ri) \\
 LC \frac{d^2 v_L}{dt^2} + RC \frac{dv_L}{dt} + v_L &= v_i
 \end{aligned} \tag{III.9}$$

Equation différentielle du second ordre à coefficient constant

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 v_L}{dt^2} &= -\frac{R}{L} \frac{dv_L}{dt} - \frac{v_L - v_i}{LC} \\
 LC \frac{d^2 v_L}{dt^2} + RC \frac{dv_L}{dt} + v_L &= v_i \\
 \frac{d^2 v_L}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dv_L}{dt} + \frac{v_L}{LC} &= 0
 \end{aligned} \tag{III.10}$$

Equation caractéristique sans second membre

On cherche des solutions de la forme

$$\begin{aligned}
 v &= e^{rt} \\
 r^2 + \frac{R}{L} r + \frac{1}{LC} &= 0 \\
 r &= -\frac{R}{2L} \pm j \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = -\lambda \pm j \sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}
 \end{aligned} \tag{III.11}$$

Avec

$$\lambda = \frac{R}{2L} \quad \text{Coefficient d'amortissement du circuit (en s}^{-1}\text{).}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{Pulsation propre du circuit (en s}^{-1}\text{)}$$

$$v_L(t) = e^{-\lambda t} (c_1 e^{j\omega t} + c_2 e^{-j\omega t}) = e^{-\lambda t} [(c_1 + c_2) \cos \omega t + j(c_1 - c_2) \sin \omega t]$$

$$v_L(t) = e^{-\lambda t} [A \cos \omega t + B \sin \omega t]$$

$$v_L(t) = e^{-\lambda t} [A \cos \omega t + B \sin \omega t] + v_i$$

$$\frac{dv}{dt} = -\lambda e^{-\lambda t} [A \cos \omega t + B \sin \omega t] + e^{-\lambda t} [-A\omega \sin \omega t + B\omega \cos \omega t]$$

$$v_L(t) = v_i \left[ 1 - e^{-\lambda t} \left( \cos \omega t + \frac{\lambda}{\omega} \sin \omega t \right) \right]$$

$$i_L(t) = c \frac{dv}{dt} = cv_i \lambda e^{-\lambda t} \left( \cos \omega t + \frac{\lambda}{\omega} \sin \omega t \right) - cv_i e^{-\lambda t} (-\omega \sin \omega t + \lambda \cos \omega t)$$

➤ **Simulation et résultats :**

Le système est simulé sous l'environnement MATLAB (simulink), les résultats obtenus sont présentés par les figures (III.10), (III.11), (III.12) et (III.13).

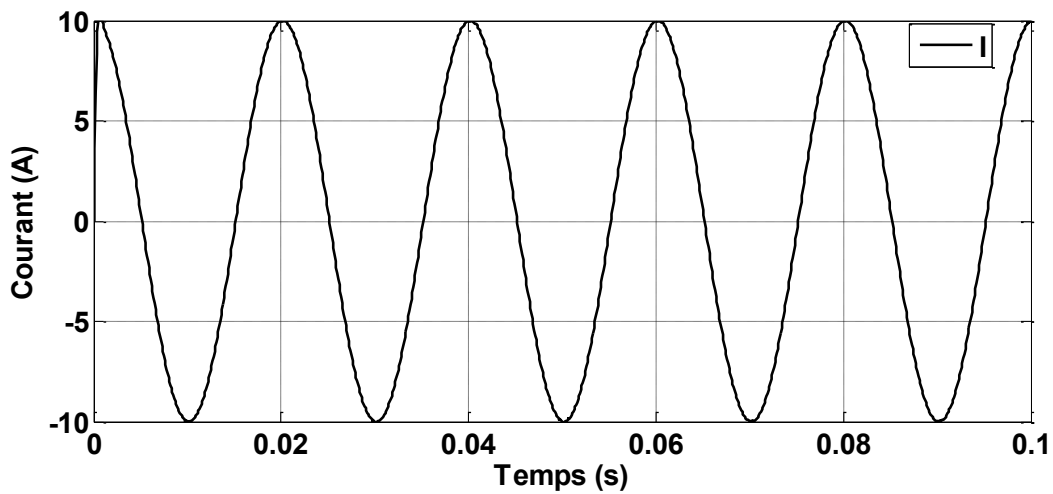


Figure.III.10 .Allure du courant  $I$  à la sortie de l'onduleur

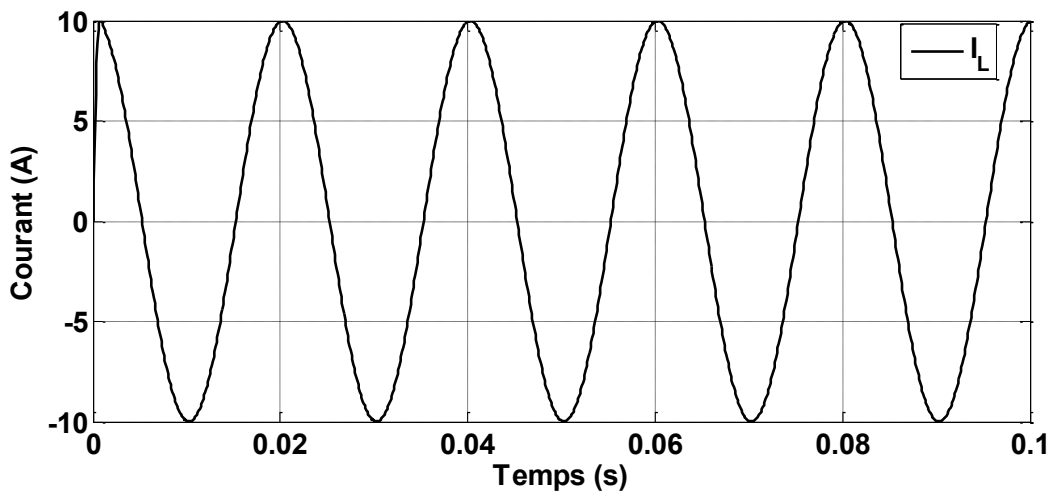
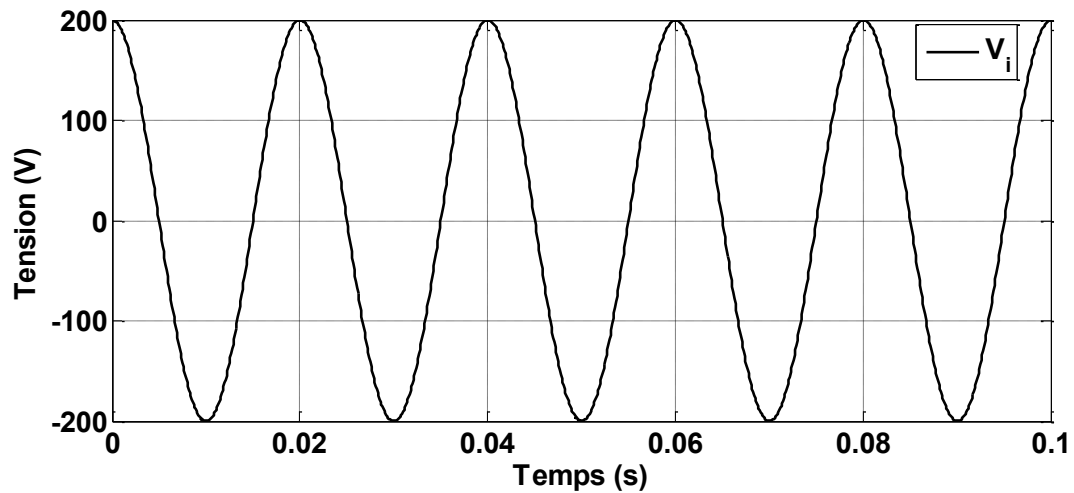
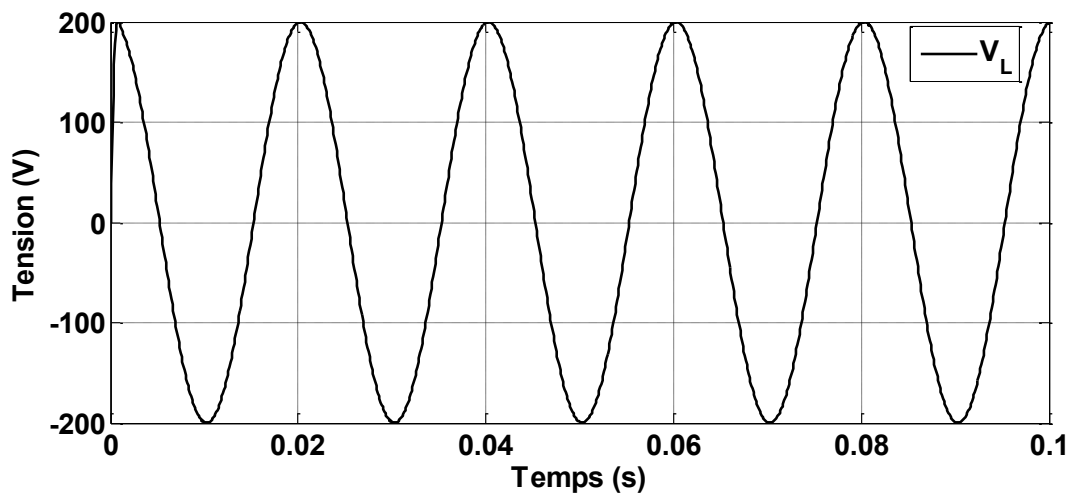


Figure.III.11 .Allure du courant de charge  $I_L$

Figure.III.12 .Allure de la tension à la sortie de l'onduleur  $V_i$ Figure.III.13 .Allure de la tension de charge  $V_L$ 

### ➤ Interprétation des résultats

- L'allure des tensions et des courants est sinusoïdale, On peut constater clairement la disparition des oscillations.
- L'ajout d'une résistance en série avec le filtre LC permet d'amortir les oscillations, mais en augmentant sa valeur, l'énergie électrique du système est progressivement dissipée par effet joule.

### III.8. Etude du système perturbé :

En appliquant une perturbation au système de la figure (III.10), le schéma de simulation est réalisé avec Power-Sim de MATLAB, il est représenté par la figure (III.15) où on déconnecte puis on connecte la charge pendant un temps ( $t=0.06s$ ) et on analyse sa réaction.

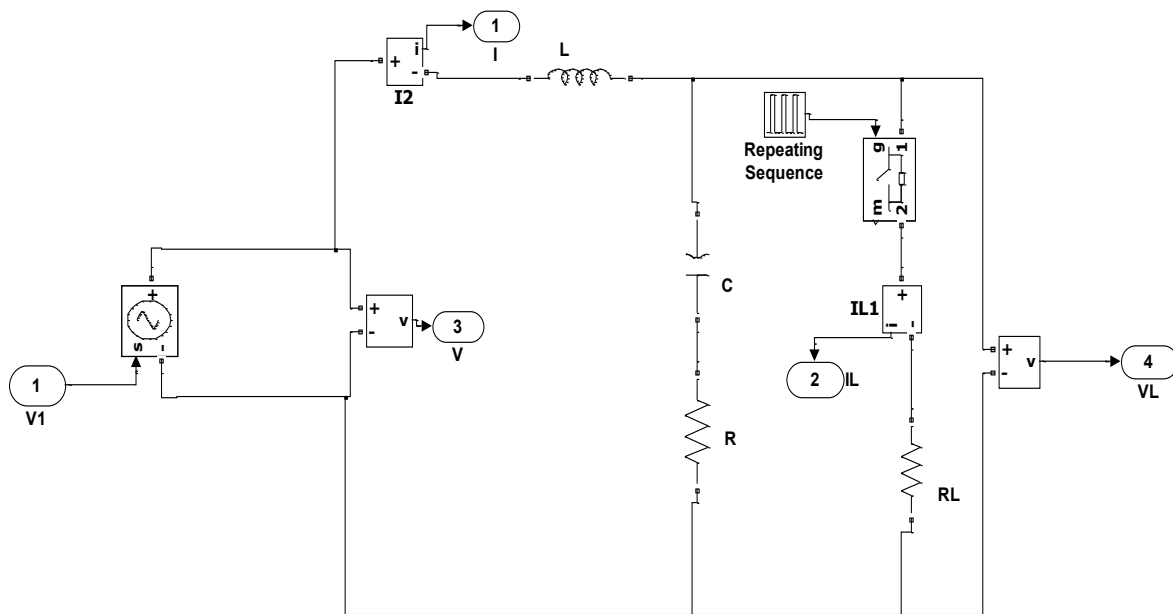


Figure.III.14. Schéma de simulation du système perturbé

Les résultats obtenus sont donnés par les figures (III.16), (III.17), (III.18) et (III.19)

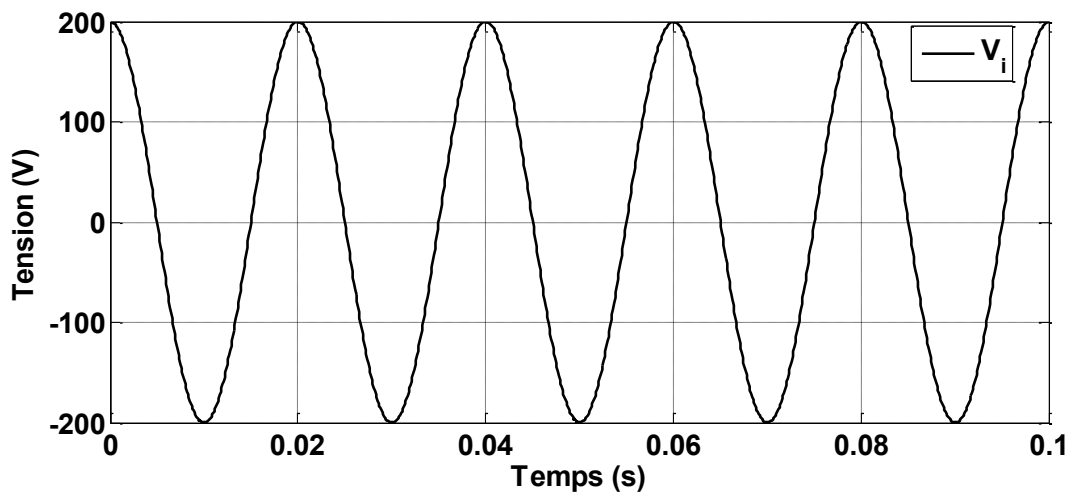
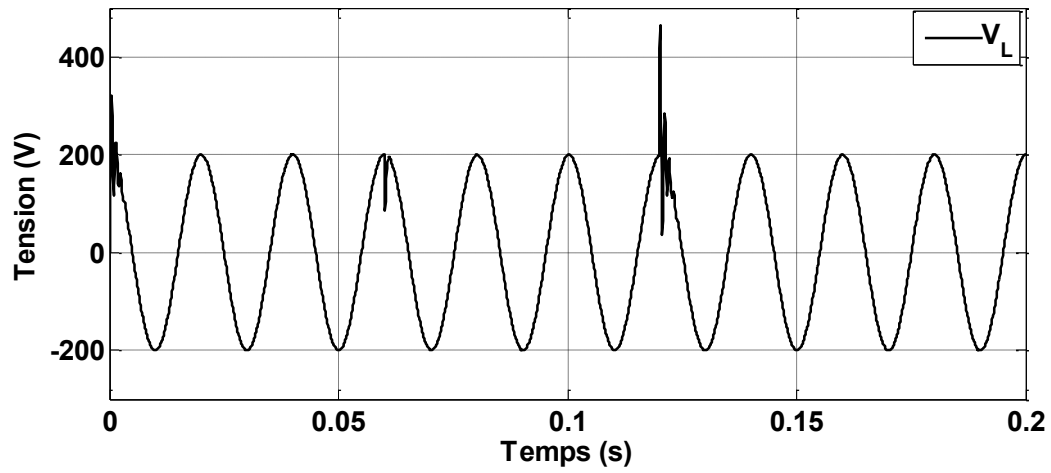
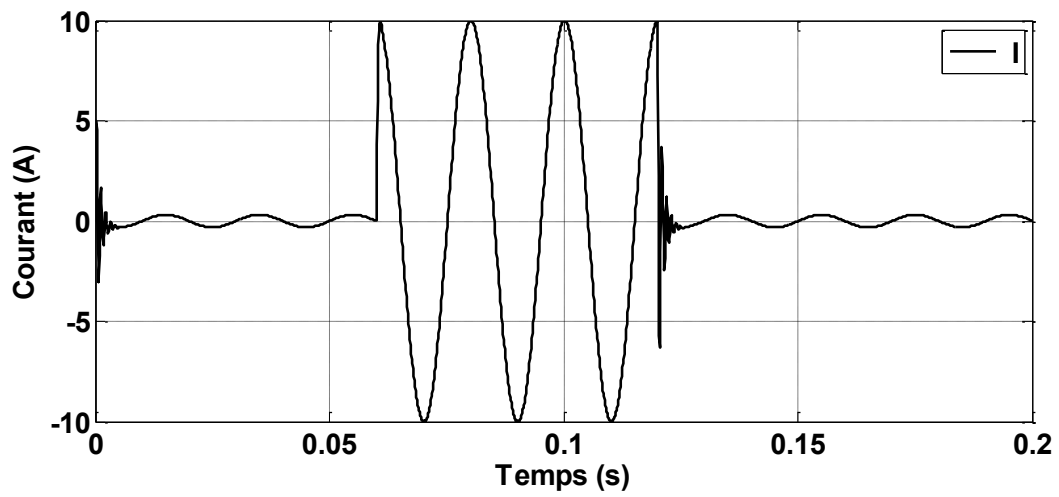
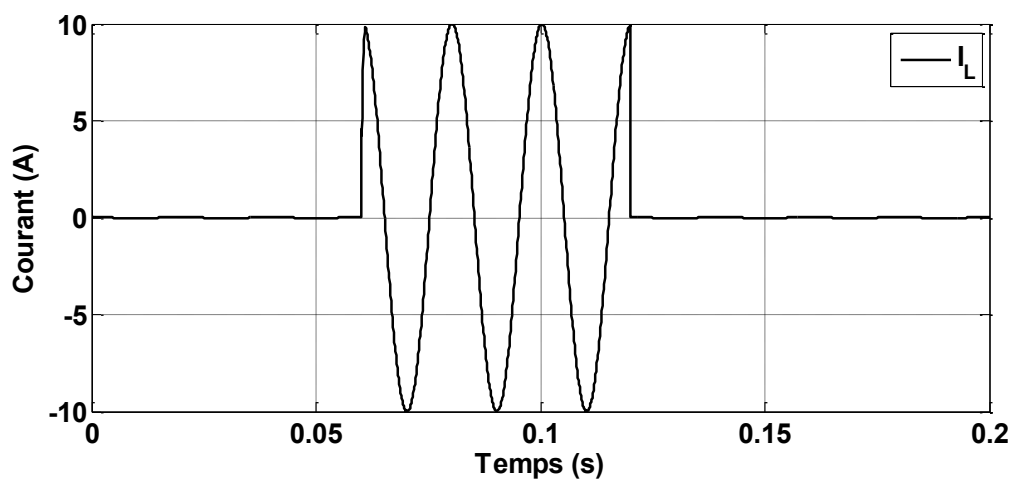


Figure.III.15. Allure de la tension  $V_i$  en sortie de l'onduleur

Figure.III.16 .Allure de la tension de charge  $V_L$ Figure.III.17 .Allure du courant  $I$  à la sortie de l'onduleurFigure.III.18 .Allure du courant de charge  $I_L$

### ➤ **Interprétation des résultats**

D'après les résultats obtenus, on constate :

- ❖ des pics de tension Cela est dû au fait que le système est perturbé (des coupures brèves)
- ❖ On remarque que le courant oscille autour de 0 à l'instant de la perturbation, puis il se rétablit, ces perturbations affectent directement l'allure de la tension (en fréquence et en amplitude).

### **III.9. Conclusion**

Au cours de ce chapitre :

Dans un premier temps, on a pu analyser le comportement de l'onduleur associé à un filtre LC, en effet les résultats de simulation du système sous MATLAB-SIMULINK ont permis de constater l'allure oscillante de la tension et du courant de charge, cela peut être expliqué par l'effet de résonance dû à l'association inductance-capacité qui conduit à l'instabilité du système.

Dans un deuxième temps, afin d'atténuer les oscillations, on a associé au filtre LC une résistance R en série. Après simulation du système, on a pu constater que les ondes des tensions et des courants obtenus ont une allure sinusoïdale amortie. L'atténuation passive a l'avantage d'être simple et fiable, par contre l'adjonction d'un élément résistif augmente les pertes dissipées par effet Joule.

En dernier, on a étudié le comportement du système perturbé, on a créé une perturbation. on a pu conclure que cette dernière affecte directement en amplitude et en fréquence l'onde du courant et de la tension de sortie.

Dans ce qui suit on essaye de proposer une stratégie de commande pour améliorer la qualité du courant et de la tension de sortie pour avoir un système plus performant.

# **Chapitre IV**

**Amortissement virtuel**

**Et régulation**

**De la tension**

### IV.1. Introduction

Le bon fonctionnement des systèmes autonomes d'électricité revient à assurer une tension quasi-sinusoïdale à amplitude et à fréquence fixes avec un taux de distorsion harmonique réduit et moins d'oscillations. L'ajout de la résistance en série avec le filtre LC permet d'amoindrir les oscillations et amortir le système, cependant, elle engendre des pertes d'énergie par effet joule.

Afin de compenser ces pertes et d'atténuer les oscillations plusieurs stratégies de contrôles sont adoptées.

Dans cette partie, on propose d'étudier l'amortissement avec une résistance réelle et virtuelle et comparer les résultats obtenus par les deux méthodes.

### IV.2. Amortissement avec une résistance réelle :

La topologie de la figure IV.1 présente l'ensemble onduleur- filtre LC et une résistance d'amortissement réelle R

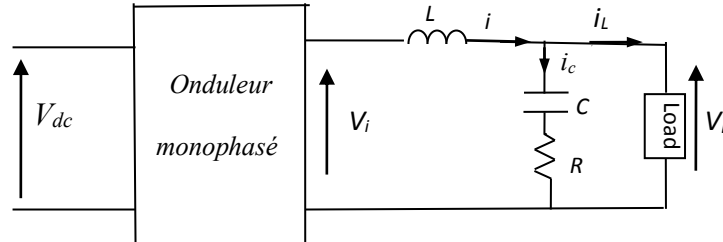


Figure. IV.1. Schéma du système avec une résistance d'amortissement réelle

L : Inductance du filtre

C : Capacité du filtre

R : Résistance réelle

Load : Charge linéaire

### ➤ Simulation et résultats

On considère un fonctionnement à vide du système, on fait la simulation sous MATLAB – SIMULINK, et les paramètres du système sont donnés par le tableau .IV.1

#### Paramètres de simulation

<i>paramètres</i>	<i>symboles</i>	<i>valeurs</i>
<i>Résistance</i>	$R$	$10\Omega - 50\Omega$
<i>Inductance</i>	$L$	$5mH$
<i>Capacité</i>	$C$	$5\mu F$
<i>Resistance</i>	$R_L$	$4000\Omega$
<i>Temps de simulation</i>	$t$	$0.2s$

Tableau. IV.1.Paramètres de simulation

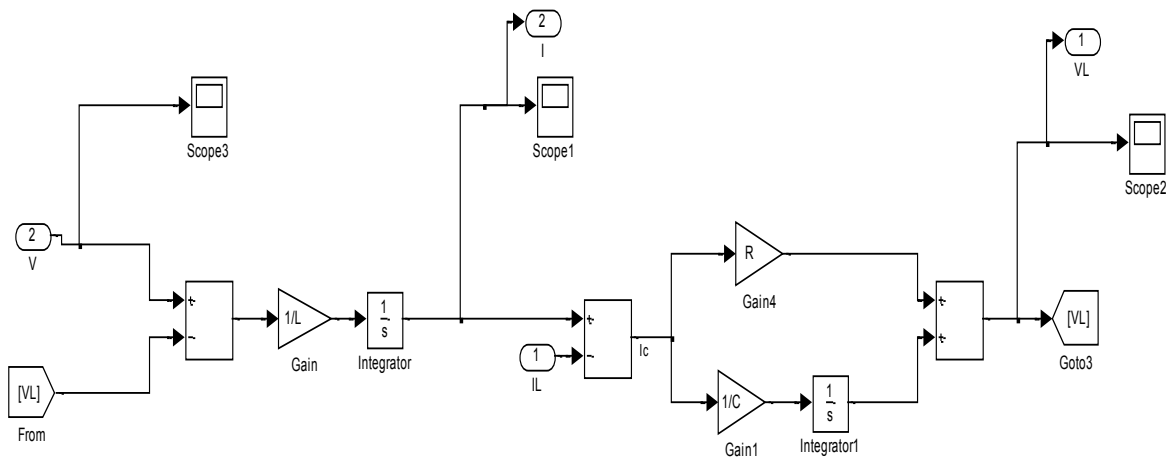


Figure. IV.2. Schéma d'implémentation de la résistance réelle

Pour différentes valeurs de la résistance d'amortissement, on relève les courbes des tensions et des courants

- $R=10\Omega$

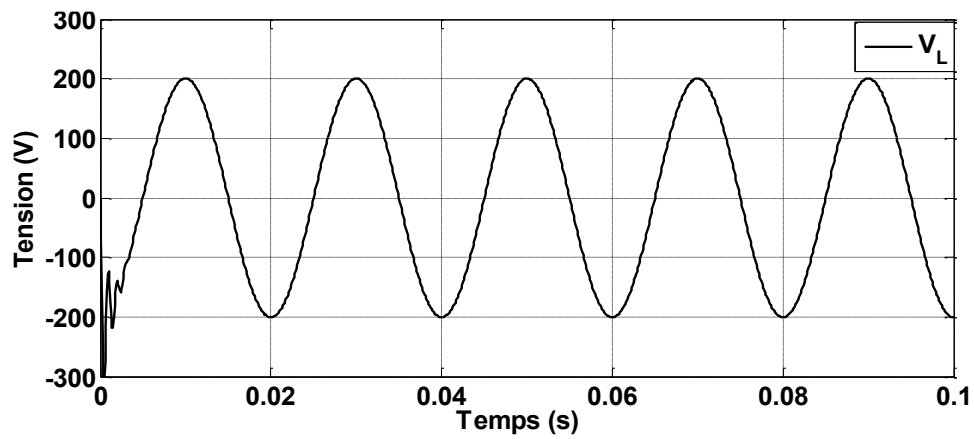


Figure. IV.3. Allure de la tension de charge  $V_L$  réelle

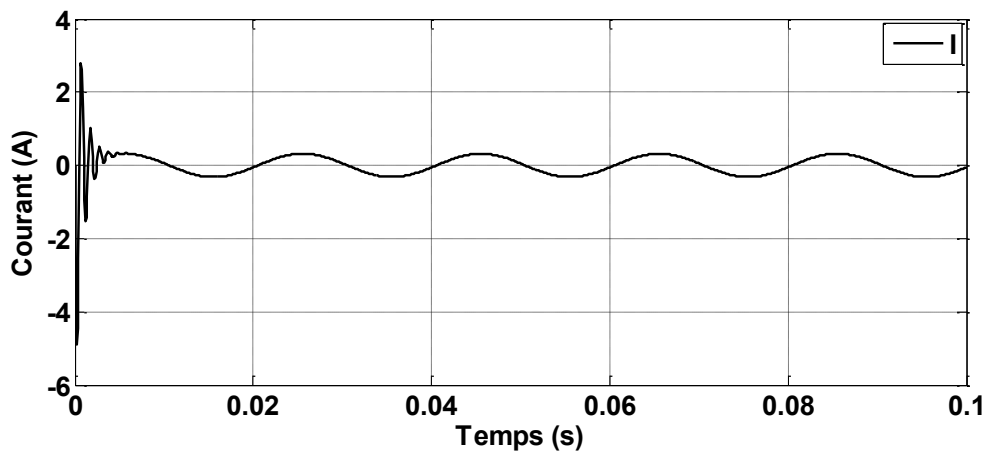
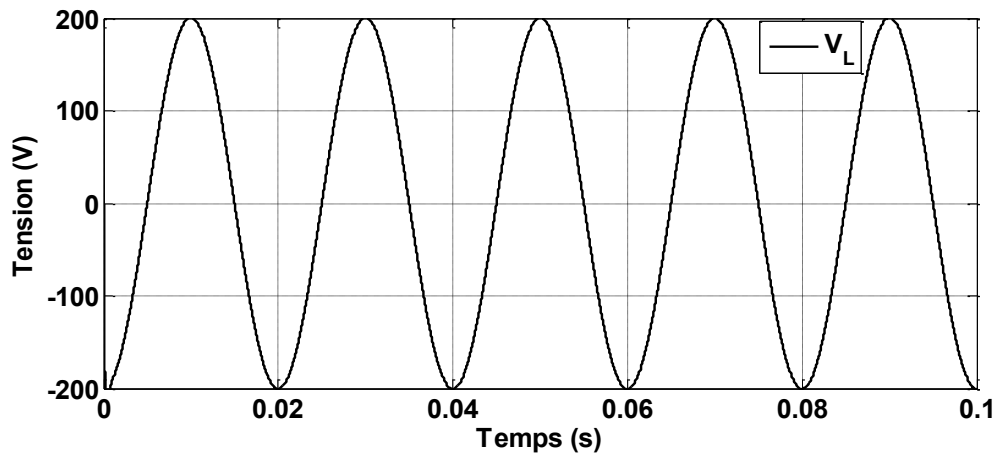
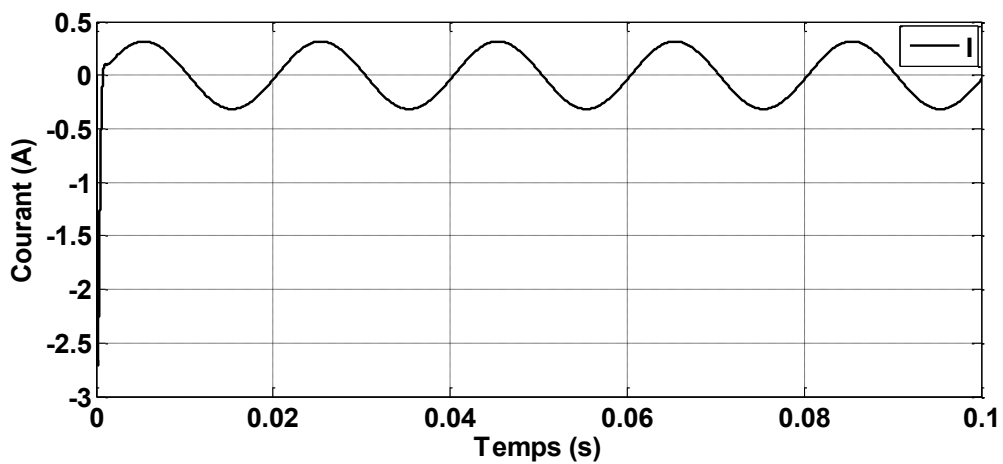


Figure. IV.4. Allure du courant  $I$  réel

on peut constater que pour une faible valeur de la résistance  $R$ , l'allure de la tension  $V_L$  ainsi que le courant  $I$  présentent des oscillations.

- $R=50\Omega$

Figure. IV.5. Allure de la tension de charge  $V_L$ Figure. IV.6. Allure du courant  $I$ 

### ➤ Interprétation des résultats

On remarque qu'avec l'augmentation de la valeur de la résistance, l'allure de la tension  $V_L$  et le courant  $I$  est sinusoïdale. On peut constater clairement la disparition des oscillations, alors le système est amorti, cependant l'énergie du système est dissipée par effet joule dans la résistance.

### IV.3- Amortissement virtuel

Une solution adaptée consiste à amortir les oscillations. L'amortissement passif classique présentant plusieurs inconvénients, la solution proposée ici consiste à émuler la présence d'une résistance d'amortissement virtuelle à travers la structure de commande. Les avantages de l'amortissement actif par rapport à l'ajout physique d'une résistance sont la réduction de l'encombrement, l'absence de surcoût, l'absence de pertes joules et surtout la possibilité d'amortir par absorption d'un courant purement harmonique. Il existe différents placements possibles pour la résistance d'amortissement d'un filtre (L, C) : en série et/ou en parallèle avec l'inductance et/ou les condensateurs [3].

Le schéma de simulation est tel représenté par la figure.(IV.7)

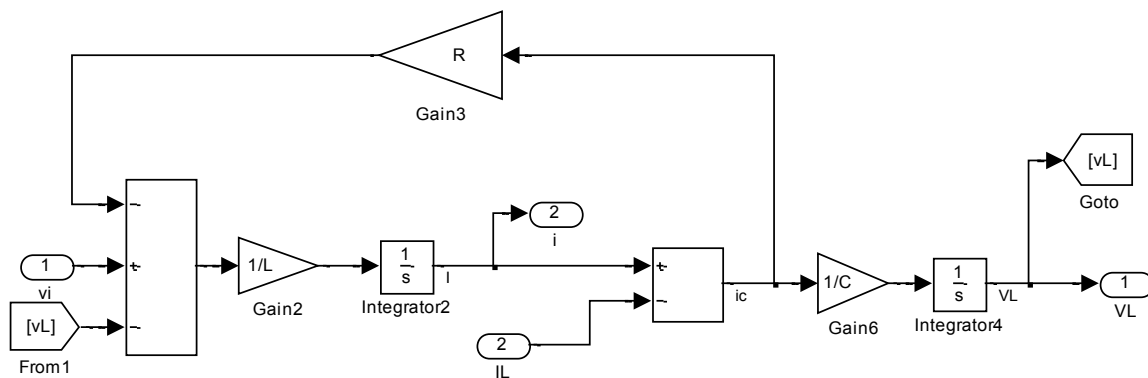


Figure. IV.7. Schéma d'implémentation de la résistance virtuelle

- Paramètres de l'onduleur

<i>paramètres</i>	<i>symboles</i>	<i>valeurs</i>
<i>Résistance</i>	<i>R</i>	<i>10Ω - 25Ω -50Ω</i>
<i>Inductance</i>	<i>L</i>	<i>5mH</i>
<i>Capacité</i>	<i>C</i>	<i>5μF</i>
<i>Resistance</i>	<i>R<sub>L</sub></i>	<i>4000Ω</i>
<i>Temps de simulation</i>	<i>t</i>	<i>0.2s</i>

Tableau. IV.2.Paramètres de simulation

➤ **Simulation et résultats**

Afin de tester la stratégie de contrôle proposée tout en évaluant ses performances, le système est simulé sous MATLAB SIMULINK, pour différentes valeurs de la résistances  $R$ , on analyse le comportement du système. Les allures de la tension de charge  $V_L$  et du courant  $I$  sont donnés respectivement par les figures (IV.8) et (IV.9)

- Pour  $R=10\Omega$

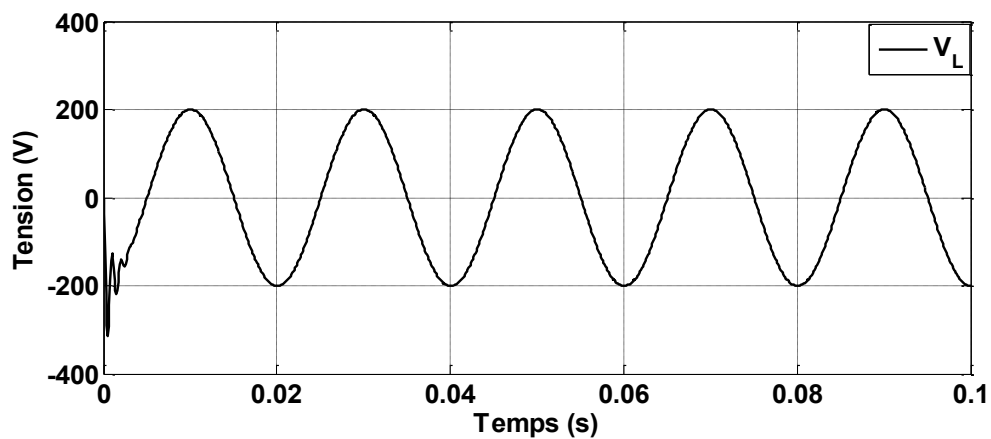


Figure. IV.8. Allure de la tension virtuelle  $V_L$

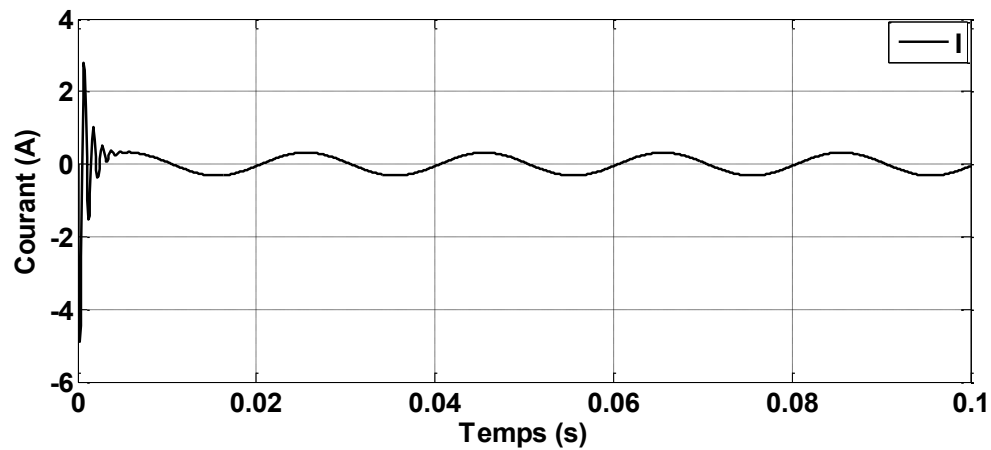


Figure. IV.9. Allure du courant  $I$  virtuel

➤ **Interprétation des résultats**

On peut constater que l'allure de la tension de charge  $V_L$  et le courant  $I$  est sinusoïdale oscillante.

- Pour  $R=50\Omega$

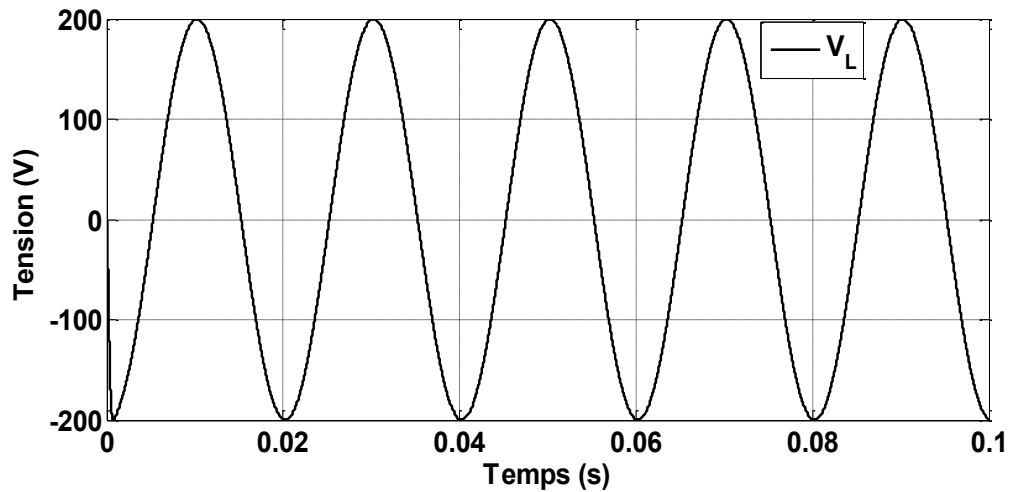


Figure. IV.10. Allure de la tension virtuelle  $V_L$

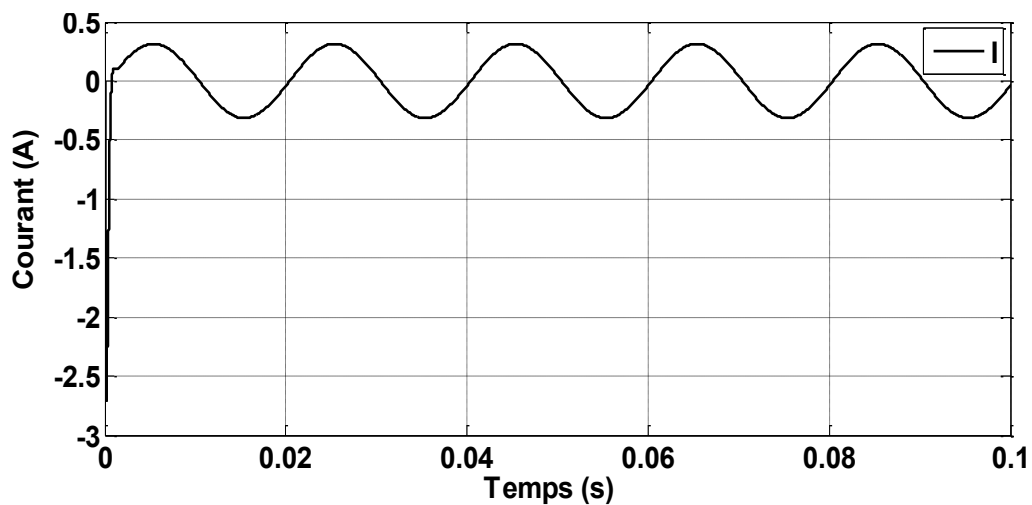


Figure. IV.11 .Allure du courant  $I$  virtuel

**IV.4-comparaison des résultats des deux méthodes d'amortissement :**

On compare l'allure des tensions de charge et les courants obtenus par les deux méthodes d'amortissement réel et virtuel.

(amortissement avec une résistance réelle) Pour différentes valeurs de la résistance  $R$  Les résultats de simulation sont représentés sur les mêmes graphes, et sont donnés par les figures (IV.12) et (IV.13), (IV.14) et (IV.15)

- Pour  $R=10\Omega$

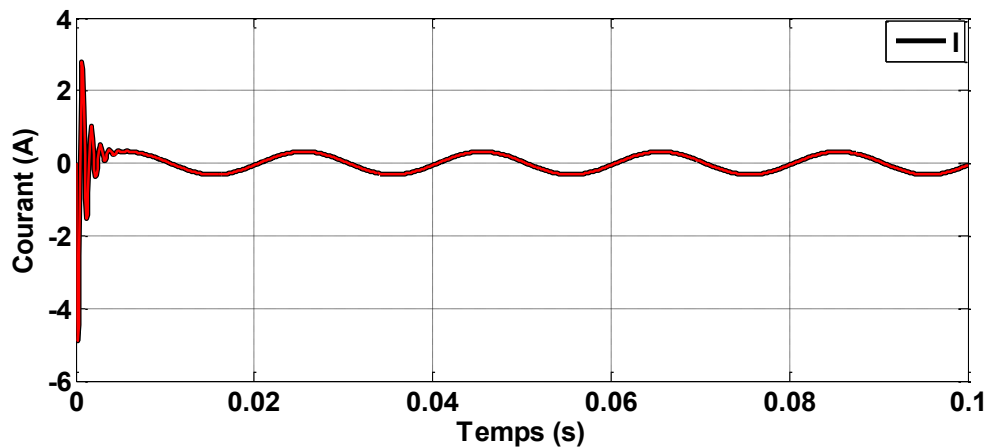


Figure. IV. 12. Allure des courants  $I$  réel et  $I$  virtuel

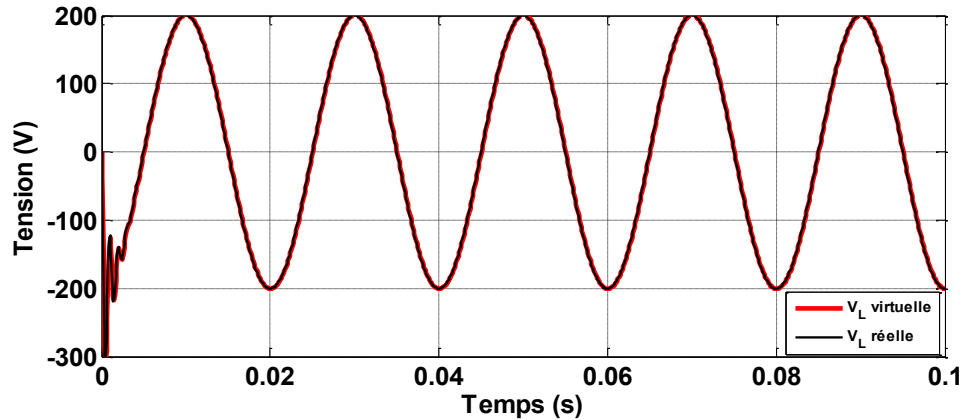
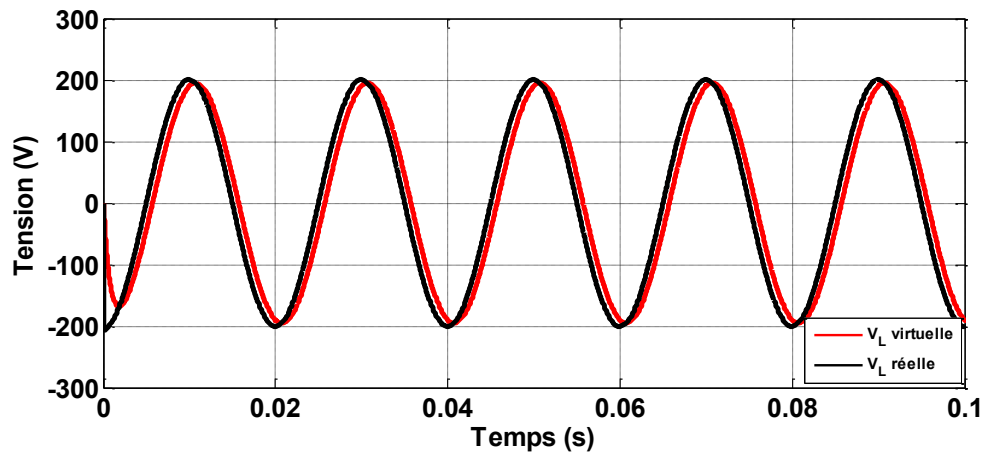
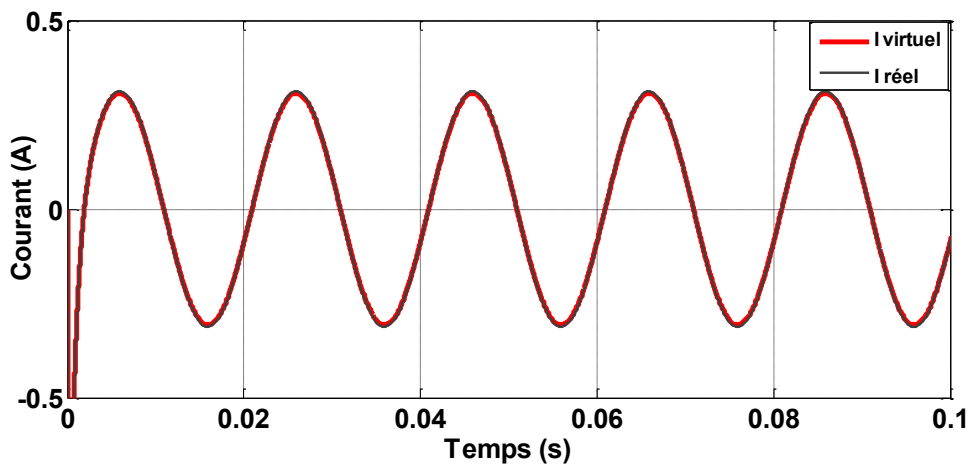


Figure. IV.13. Allures des tensions de charge  $V_L$  réelle et virtuelle

- Pour  $R=50\Omega$

Figure. IV.14. Allures des tensions de charge  $V_L$  réelle et virtuelleFigure. IV. 15.Allure des courants  $I$  réel et  $I$  virtuel

### ➤ Interprétation des résultats

On peut constater l'allure des tensions et des courants est sinusoïdale pour les deux méthodes avec un certain déphasage du au chutes de tension.

On applique un échelon de tension au système, et on refait la simulation pour différentes valeurs de la résistance et les résultats obtenus sont représentés par les figures (IV.16), (IV.17), (IV.18) et (IV.19).

Pour  $R=25\Omega$

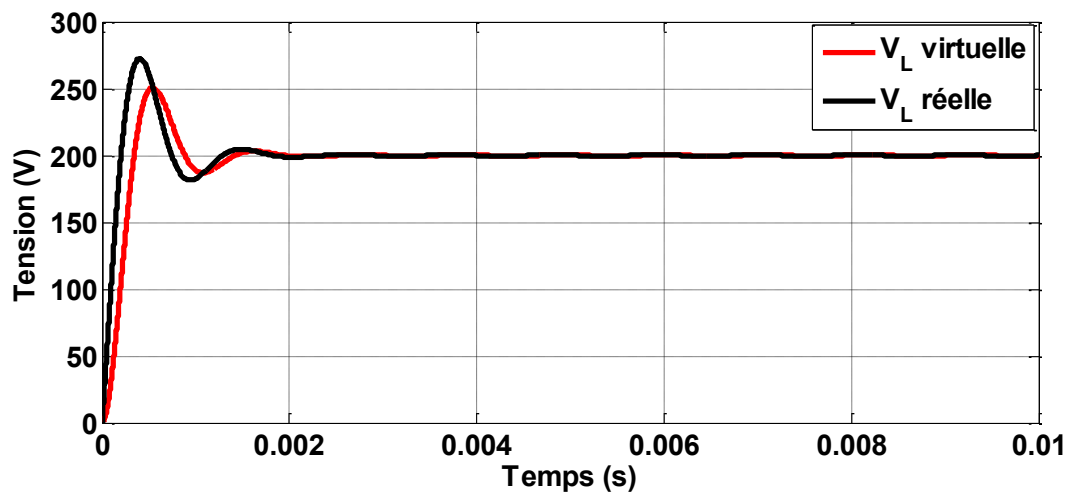


Figure. IV.16. Allure de la tension de charge  $V_L$  réelle et virtuelle

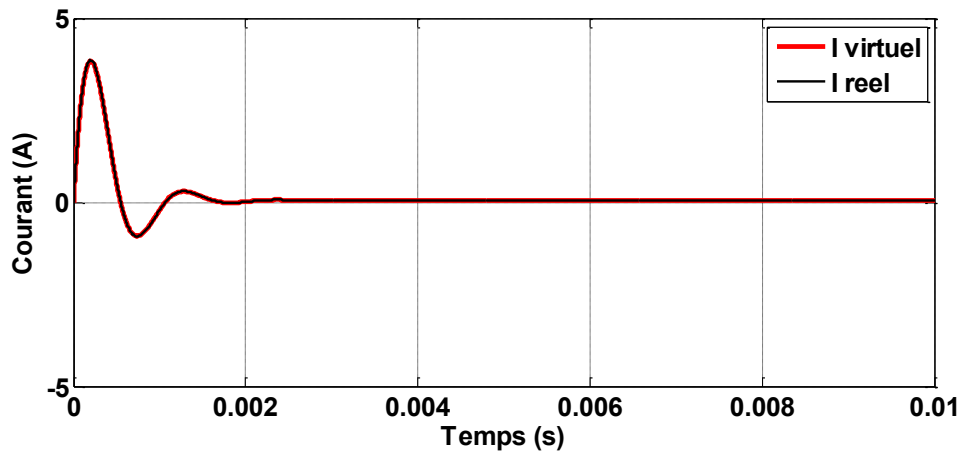


Figure. IV.17. Allure du courant  $I$  réel et virtuel

• Pour  $R=50\Omega$

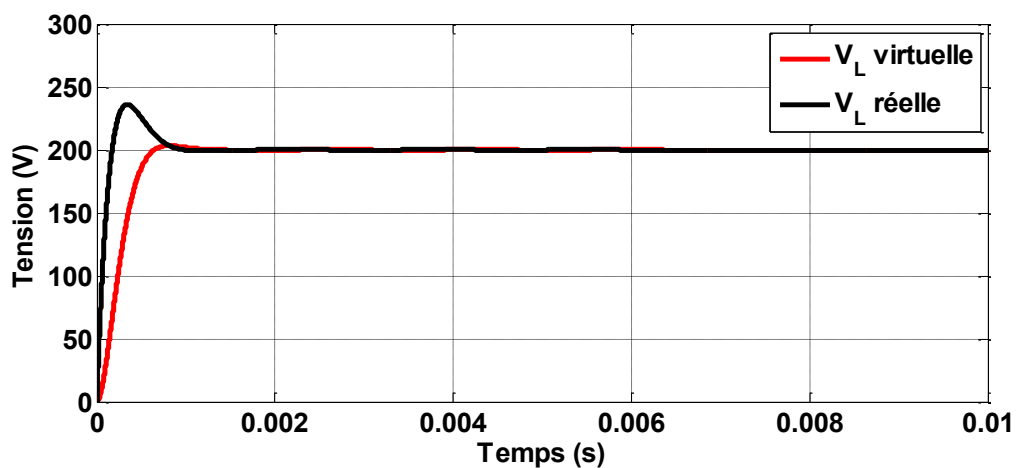
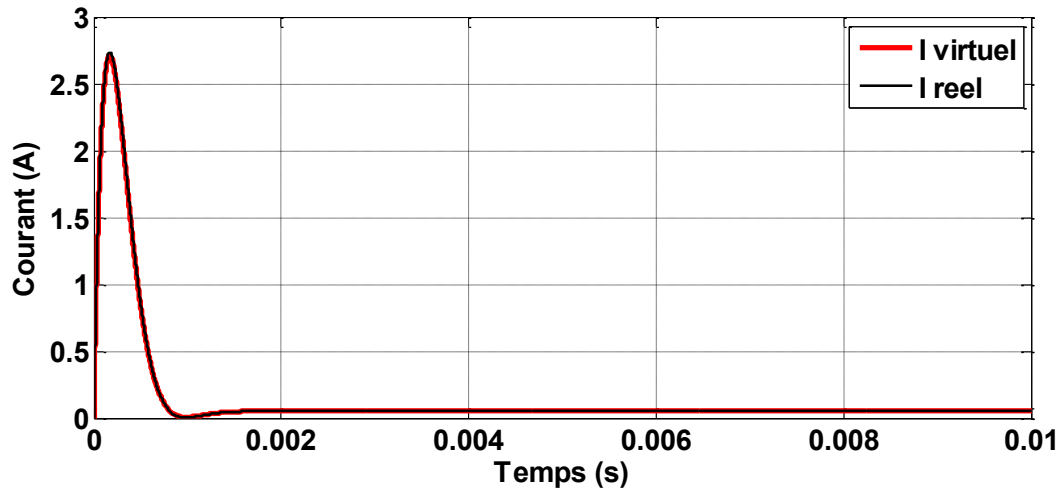


Figure. IV.18. Allure de la tension de charge  $V_L$  réelle et virtuelle

Figure. IV.19. Allure des courants  $I_{réel}$  et  $I_{virtuel}$ 

### ➤ Interprétation des résultats

On peut constater que le système est amorti

Présence d'un écart entre la tension d'entrée  $V_i$  et la tension de sortie  $V_L$  (erreur statique)

Afin d'avoir une tension de sortie  $V_L$  la plus proche de la tension d'entrée  $V_i$ , un système de régulation est nécessaire et cela fait l'objet de ce qui suit.

### IV.5. Système de régulation

Dans le but d'améliorer les performances de réglage de la tension de sortie  $V_L$ , nous avons utilisé un régulateur PI.

### IV.6. Régulateur proportionnel-intégral (PI)

Ce type de contrôleur est largement utilisé pour la commande des systèmes linéaires.

Sa structure est donnée par la figure IV.20

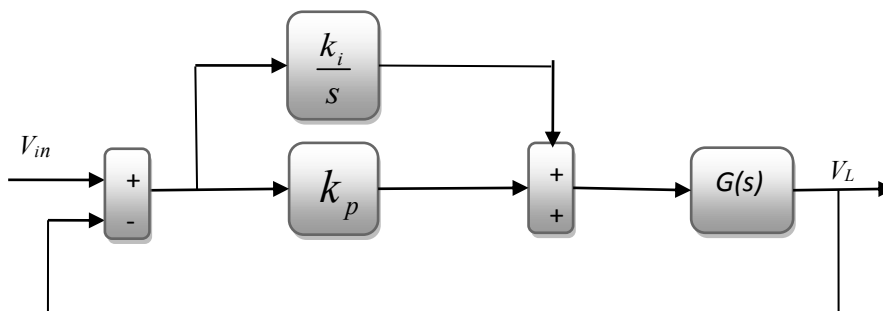


Figure IV.20. Système incluant un contrôleur PI.

- **Régulation proportionnelle**

Le rôle du gain  $K_i$  est de réduire l'erreur de réglage, qui est inversement proportionnelle à ce gain. Plus le gain est grand, plus l'erreur est réduite et plus la réponse devient de plus en plus oscillatoire. [23]

- **Régulation intégrale**

Le rôle principal de l'action intégrale  $\frac{k_i}{s}$  est d'éliminer l'erreur statique. Toutefois l'action intégrale est un élément à retard de phase. La valeur optimale du gain  $k_i$  est choisie pour satisfaire un compromis stabilité- rapidité [6].

$K_p$  : est le gain de l'action proportionnel

$K_i$  : est le gain de l'action intégrale

Le schéma de simulation du système avec le régulateur PI est donné par la figure IV.21.

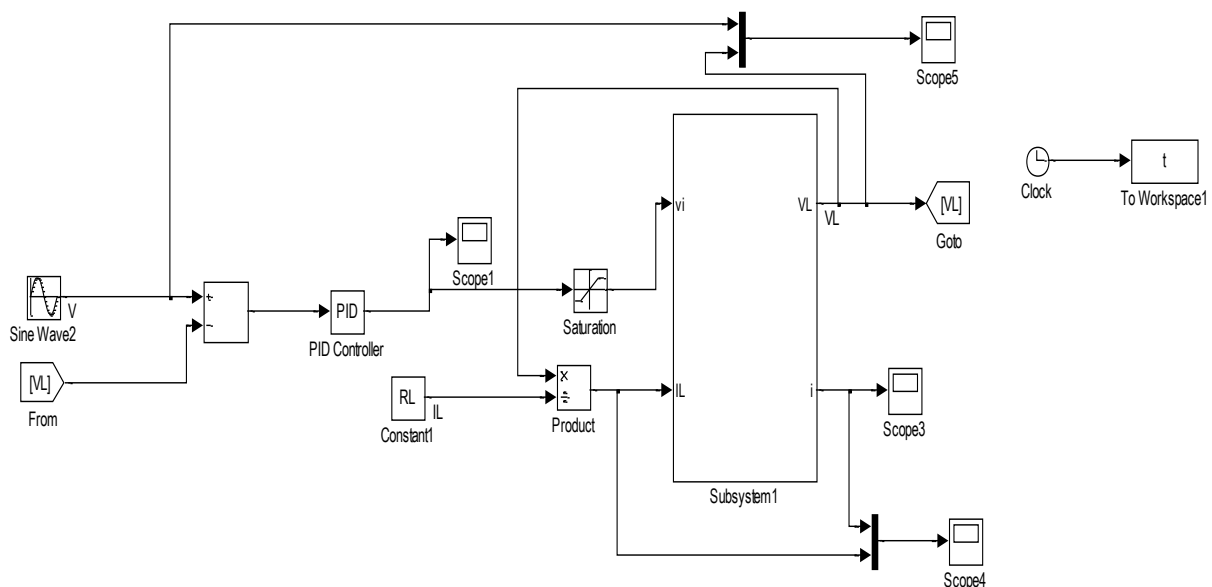


Figure IV.21. Schéma d'implémentation du système avec régulateur PI.

➤ Paramètres de simulation

<i>paramètres</i>	<i>symboles</i>	<i>valeurs</i>
Résistance d'amortissement	$R$	$50\Omega$
Inductance du filtre	$L$	$5mH$
Capacité du filtre	$C$	$5\mu F$
Résistance de charge	$R_L$	$1000\Omega$
Temps de simulation	$t$	$0.2s$

Tableau. IV.2. Paramètres de simulation du système avec le régulateur PI

➤ Simulation et résultats

Les paramètres  $K_p$  et  $K_i$  du régulateur PI sont déterminés par simulation en fixant l'un et en variant l'autre, jusqu'à atteindre une allure de la tension de sortie la plus proche de celle d'entrée (une erreur statique la plus faible possible).

Les résultats de simulation sont présentés par les figures IV-22, IV-23, IV-24 et IV-25

Pour  $k_p = 100$  et  $k_i = 0.001$

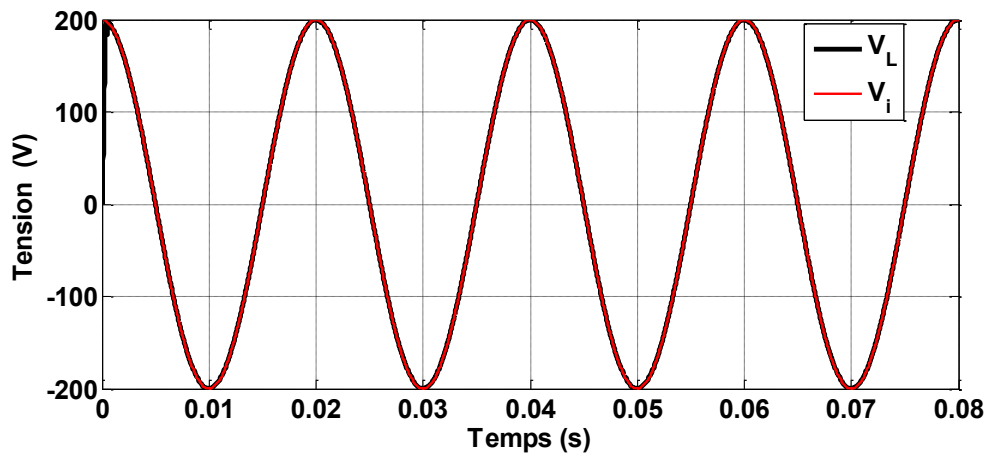


Figure. IV.22. Allure de la tension d'entrée  $V_i$  et la tension de sortie  $V_L$

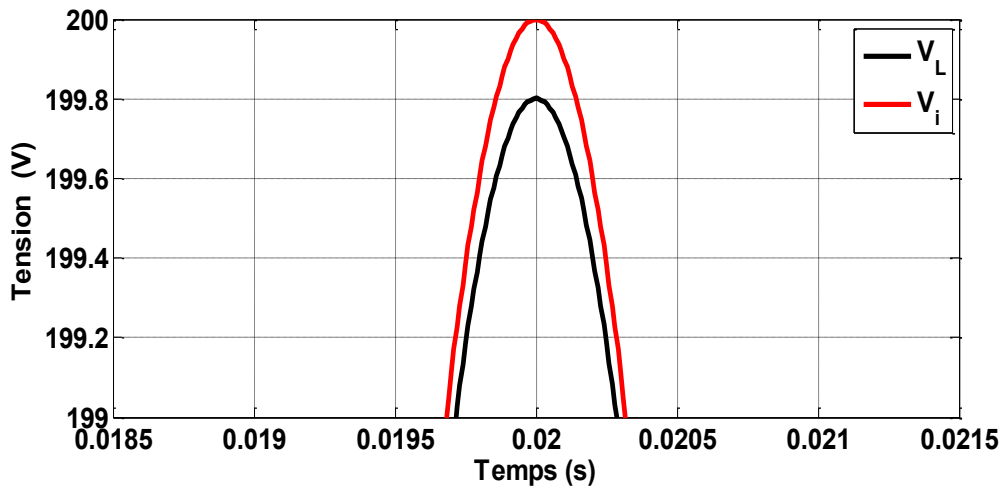


Figure. IV.23. L'erreur statique entre la tension d'entrée  $V_i$  et la tension de sortie  $V_L$

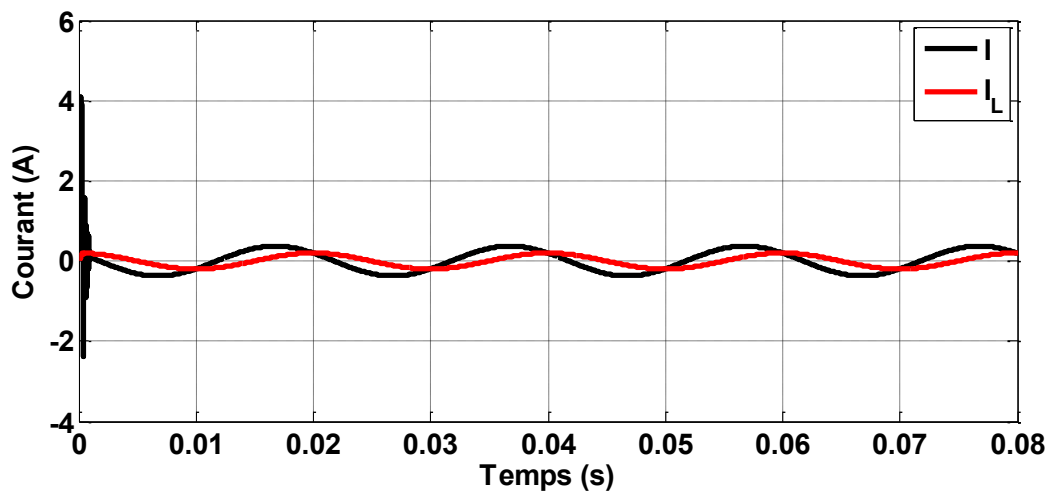


Figure. IV.24. Allure du courant d'entrée  $I$  et le courant de charge  $I_L$

- En appliquant un échelon de tension, on refait la simulation pour les mêmes paramètres du régulateur

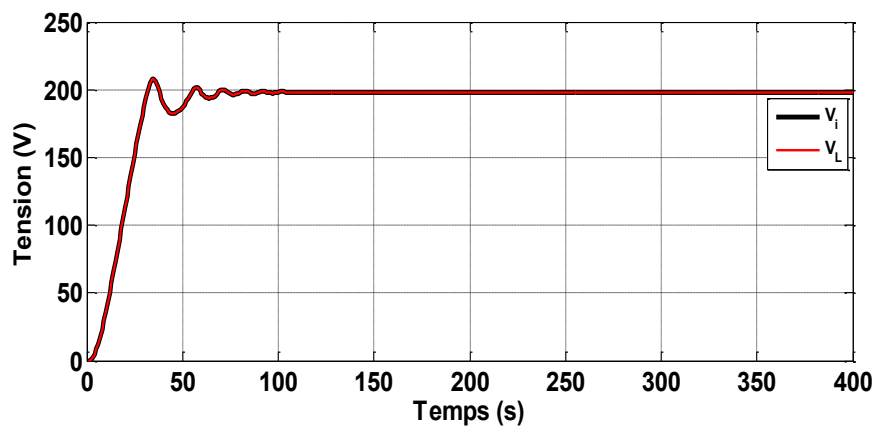


Figure. IV.25. Allure de la tension d'entrée  $V_i$  et la tension de sortie  $V_L$

➤ **Interprétation des résultats**

D'après les résultats de simulation, on a constaté une erreur statique réduite entre la tension d'entrée  $V_i$  et la tension de sortie  $V_L$ , ainsi de même pour les courants. D'après les courbes obtenues cette erreur est de 0.2, elle est presque négligeable.

#### **IV.6. Conclusion**

- Au cours de ce chapitre, on a étudié deux méthodes d'amortissement réel et virtuel, on a pu conclure que l'amortissement réel est efficace, cependant l'énergie du système est dissipée par effet joule dans la résistance.
- L'amortissement virtuel consiste à émuler la présence de la résistance à travers la boucle de commande.
- La comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes a montré que l'allure de la tension de sortie  $V_L$  obtenue avec l'amortissement virtuel suit celle obtenue avec l'amortissement réel avec un écart (une erreur statique) dû aux chutes de tension.
- Afin de réduire cette erreur, un régulateur PI est introduit. Par simulation, on a pu déterminer ses paramètres qui donnent l'erreur statique la plus faible.

Dans la partie suivante on proposera une autre stratégie de commande afin d'annuler l'erreur statique. cette méthode consiste d'étudier le système dans le référentiel (d,q)

# **Chapitre V**

## **Commande dans Le référentiel DQ**

### V.1.Introduction :

L'amélioration de la forme de la tension de sortie des convertisseurs est un axe de recherche très actif, qui ne cesse de développer en profitant de la technologie des semi-conducteurs.

Pour améliorer la tension de sortie d'un onduleur, on peut agir sur sa structure ou sur la méthode de sa commande.

Dans cette partie on propose d'étudier une stratégie de commande qui est basée sur le passage vers un autre repère de référence (DQ), pour parvenir à contrôler des variables continues et non alternatives.

### V.2.Stratégie de commande (DQ) :

Cette stratégie de commande appelée en anglais (direct-quadrature (*DQ*) rotating frame control) est utilisée pour la commande des systèmes triphasés, afin qu'elle soit applicable en monophasé, la création d'une deuxième phase est recommandée, grâce à la transformation de Clark, un système de coordonnées fixe ( $\alpha$ - $\beta$ ) est créé, en utilisant la transformée de Park il est converti en système de coordonnées tournant (DQ). Grâce à ce type de transformation, les grandeurs de commande sont des signaux continus.

### V.3.Système de modélisation :

L'onduleur monophasé en pont considéré pour cette étude est tel représenté par la figure (V.1), il est constitué de quatre IGBT connectés à une source de tension continue  $V_{dc}$  et un filtre LC.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  et  $S_4$  sont les interrupteurs de l'onduleur.  $L$  et  $C$  sont respectivement l'inductance et la capacité du filtre,  $R$  est la résistance d'amortissement.

Dans cette configuration, le filtre LC est utilisé pour filtrer les harmoniques de commutation de l'onduleur afin d'avoir une meilleure qualité de la tension de sortie. La résistance d'amortissement est utilisée pour amortir les oscillations.

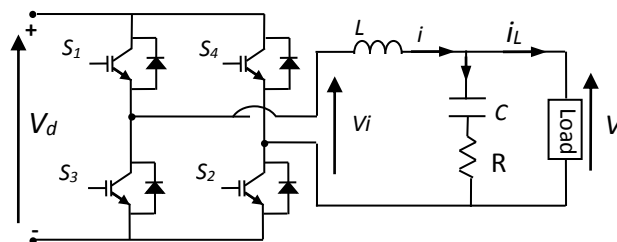


Figure. V.1.Schéma de l'onduleur avec un filtre LCR

Les équations régissant le circuit sont données par l'équation V.1

$$\begin{cases} V_i = L \frac{di}{dt} + V \\ C \frac{dV}{dt} = i_c + RC \frac{di_c}{dt} \\ i = i_L + i_c \end{cases} \quad (\text{V.1})$$

Avec

$$V_i = uV_{dc}$$

$u$  est le rapport cyclique, il dépend des séquences de conduction des commutateurs

$$u = \{-1 \ 0 \ 1\}$$

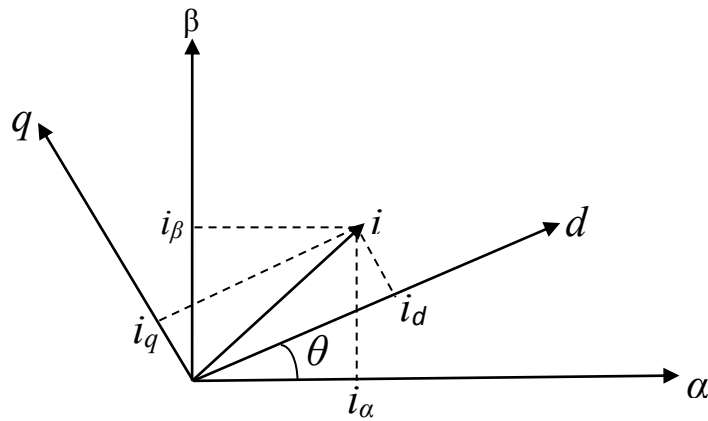


Figure V.2. Diagramme vectoriel du repère fixe et tournant ( $\alpha\beta$ -dq)

En utilisant le diagramme vectoriel de la figure V.2, les équations dans le plan stationnaire deviennent :

$$\begin{cases} V_{i\alpha\beta} = L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} + V_{\alpha\beta} \\ C \frac{dV_{\alpha\beta}}{dt} = i_{C\alpha\beta} + RC \frac{di_{C\alpha\beta}}{dt} \\ i_{\alpha\beta} = i_{L\alpha\beta} + i_{C\alpha\beta} \end{cases} \quad (\text{V.2})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = u_{\alpha\beta} V_{dc} - V_{\alpha\beta} \\ C \frac{dV_{\alpha\beta}}{dt} = i_{C\alpha\beta} + RC \frac{di_{C\alpha\beta}}{dt} \\ i_{\alpha\beta} = i_{L\alpha\beta} + i_{C\alpha\beta} \end{array} \right. \quad (V.3)$$

➤ **Simulation et résultats :**

Le système est simulé sous MATLAB SIMULINK, les paramètres de simulation sont donnés par le tableau V.1

➤ **Paramètres de simulation**

<i>paramètres</i>	<i>symboles</i>	<i>valeurs</i>
<i>Tension</i>	$V_{dc}$	$200V$
<i>Résistance d'amortissement</i>	$R$	$10\Omega$
<i>Inductance du filtre</i>	$L$	$5mH$
<i>Capacité du filtre</i>	$C$	$5\mu F$
<i>Résistance de charge</i>	$R_L$	$20\Omega$
<i>Temps de simulation</i>	$t$	$0.2s$

Tableau.V.1.paramètres de simulation

➤ **Schéma de simulation**

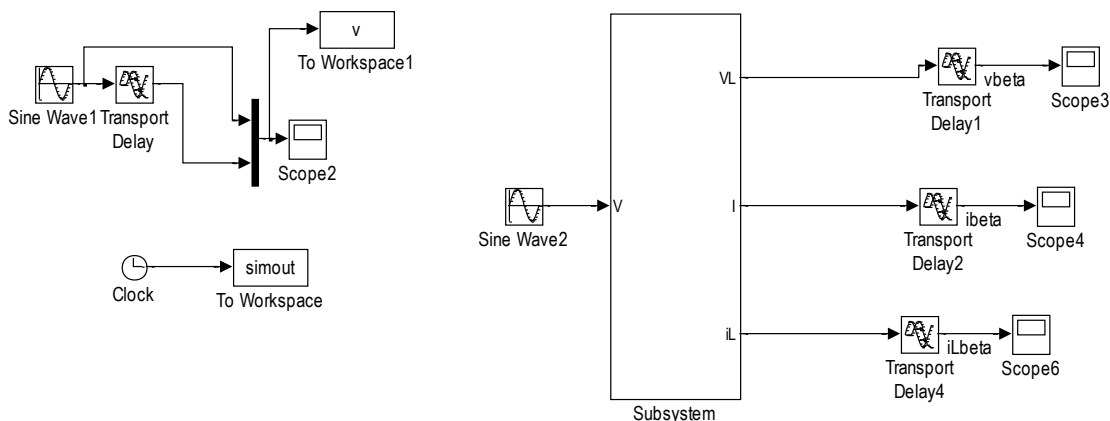


Figure.V.3. Schéma d'implémentation des composantes ( $\alpha \beta$ ) sous Matlab Simulink

L'allure des tensions  $V_\alpha$  et  $V_\beta$  sont données par la figure .V.3

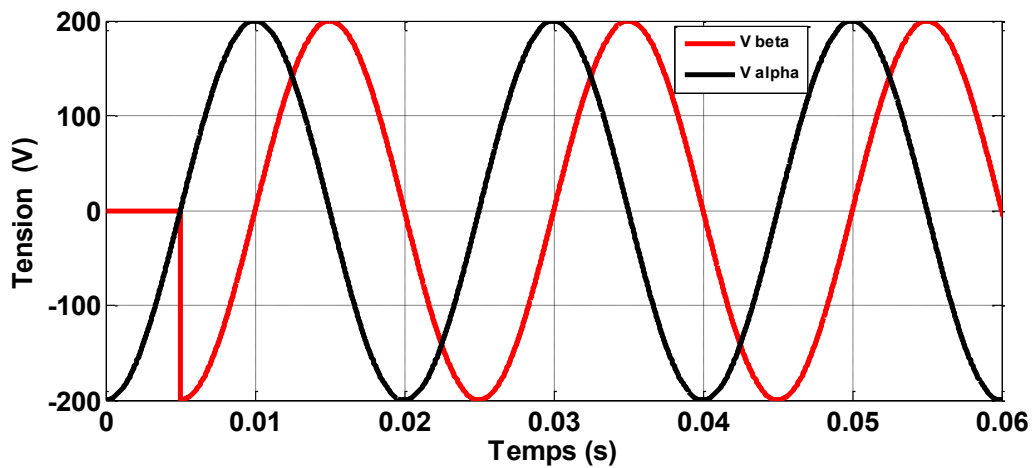


Figure. V.4.Allure des tensions  $V_\alpha$  et  $V_\beta$

On peut constater que la tension  $V_\beta$  présente un retard d'un quart de cycle par rapport à  $V_\alpha$

Après avoir créé la composante  $\beta$ , en utilisant la transformation de Park, on va créer le repère tournant (DQ), il tourne avec une pulsation  $\omega$  et déphasé du repère fixe ( $\alpha, \beta$ ) avec un angle  $\theta = \omega t$ .

L'expression de ses composantes sont données par l'équation (V.4)

$$\begin{cases} X_d = x_\alpha \cos \theta + x_\beta \sin \theta \\ X_q = -x_\alpha \sin \theta + x_\beta \cos \theta \end{cases} \quad (\text{V.4})$$

La transformée inverse de Park est donnée par l'équation (V.5)

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (\text{V.5})$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \left( T^{-1} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \right) = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}$$

$$T \frac{d}{dt} T^{-1} = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}$$

Exprimons l'équation différentielle pour les courants dans le repère tournant dq :

$$L \begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{V.6})$$

$$L \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = -L \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + V_{dc} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (\text{V.7})$$

$$\begin{cases} L \frac{dI_d}{dt} = L\omega I_q + V_{dc} U_d - V_d \\ L \frac{dI_q}{dt} = -L\omega I_d + V_{dc} U_q - V_q \end{cases} \quad (\text{V.8})$$

Exprimons l'équation différentielle pour les tensions dans le repère tournant (d, q)

$$C \left[ \frac{dV_d}{dt} \right] + C \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + RC \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}}{dt} \\ \frac{di_{cq}}{dt} \end{bmatrix} + RC \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}$$

$$C \frac{dV_{dq}}{dt} = \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} - C \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + RC \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}}{dt} \\ \frac{di_{cq}}{dt} \end{bmatrix} + RC \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} C \frac{dV_d}{dt} = i_{cd} + C\omega V_q + RC \frac{di_{cd}}{dt} - RC\omega i_{cq} \\ C \frac{dV_q}{dt} = i_{cq} - C\omega V_d + RC \frac{di_{cq}}{dt} + RC\omega i_d \end{cases} \quad (\text{V.9})$$

$$\begin{cases} i_d = i_{Ld} + i_{cd} \\ i_q = i_{Lq} + i_{cq} \end{cases} \quad (\text{V.10})$$

Pour la commande, on néglige les termes de couplage

$$\begin{cases} L \frac{di_{dq}}{dt} = V_{dc} u_{dq} - V_{dq} \\ C \frac{dV_{dq}}{dt} = i_{cdq} + RC \frac{di_{cdq}}{dt} \\ i_{dq} = i_{Ldq} + i_{cdq} \end{cases} \quad (\text{V.11})$$

#### V.4 Commande de l'onduleur

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous systèmes ayant des dynamiques différentes. On peut de ce fait, synthétiser deux régulateurs, un pour la boucle interne des courants et un autre pour la boucle externe de la tension continue. D'autre part, il est bien connu que la performance de la boucle des courants joue un rôle essentiel dans la performance globale du système ; c'est pourquoi une commande ayant une réponse rapide et un bon comportement en état stationnaire s'avère nécessaire. Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation de commandes classiques, en particulier du type proportionnel semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables.

##### V.4.1. Boucle de régulation des courants continus

La boucle de chaque courant sur les axes d et q doit être rapide pour effectuer un bon suivi des consignes. Son schéma fonctionnel est représenté par la figure V.5

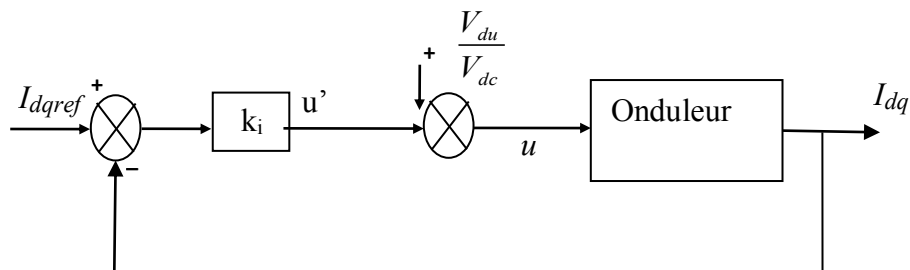


Figure. V.5. Schéma de la boucle des courants

L'équation différentielle du modèle établi est donnée par la première équation de V.11

$$L \frac{di_{dq}}{dt} = V_{dc} u_{dq} - V_{dq}$$

Sa fonction de transfert est donnée par l'équation V.12

$$L \frac{di_{dq}}{dt} = V_{dc} \left( u_{dq} - \frac{V_{dq}}{V_{dc}} \right)$$

$$\frac{L}{V_{dc}} \frac{di_{dq}}{dt} = u_{dq} - \frac{V_{dq}}{V_{dc}}$$

$$u_{dq} - C i_{dq} = u'_{dq}$$

$$\frac{i_{dq}(s)}{u'_{dq}(s)} = \frac{V_{dc}}{sL} \quad (\text{V.12})$$

En utilisant un régulateur proportionnel, la fonction de transfert est donnée par l'équation V.13 :

$$\frac{i_{dq}(s)}{u'_{dq}(s)} = \frac{\frac{K_i V_{dc}}{sL}}{1 + K_i \frac{V_{dc}}{sL}}$$

$$\frac{K_i V_{dc}}{sL + K_i V_{dc}}$$

$$\frac{\frac{K_i V_{dc}}{L} s + 1}{K_i V_{dc}} ; \text{ On pose } \frac{L}{K_i V_{dc}} = \tau_i = 0.001$$

$$\frac{i_{dq}(s)}{i_{dq\_ref}(s)} = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (\text{V.13})$$

On pourra déterminer la valeur de  $K_i$  :

$$\Rightarrow K_i = \frac{L}{\tau_i V_{dc}} = \frac{5 \times 10^{-3}}{0.001 \times 200} = 0.02$$

$\tau_i$  : Constante de temps

$K_i$  : Gain du régulateur

### V.4.2. Boucle de régulation des tensions continues :

La régulation de la tension du bus DC se fait à partir d'une boucle externe de dynamique plus lente que celle de la boucle de courant.

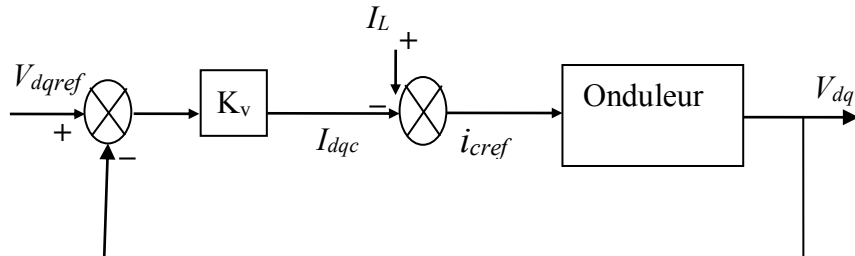


Figure. V.6. Schéma de la boucle des tensions

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par l'équation (V.14)

$$C \frac{dV_{dq}}{dt} = i_{cdq} + RC \frac{di_{cdq}}{dt}$$

$$CsV_{dq}(s) = i_{cdq}(s) + RCsi_c(s)$$

$$I_{dq}(s)(1 + RCs)$$

$$\frac{V_{dq}(s)}{I_{cdq}(s)} = \frac{(1 + RCs)}{Cs} \quad (\text{V.14})$$

La fonction de transfert en boucle fermée avec le régulateur :

$$\frac{V_{dq}(s)}{v_{dq\_ref}(s)} = \frac{\frac{(1 + RCs)}{Cs} K_v}{1 + \frac{(1 + RCs)}{Cs} K_v}$$

$$\frac{(1 + RCs) K_v}{Cs + (1 + RCs) K_v}$$

$$= \frac{K_v}{\frac{Cs}{1 + RCs} + K_v}$$



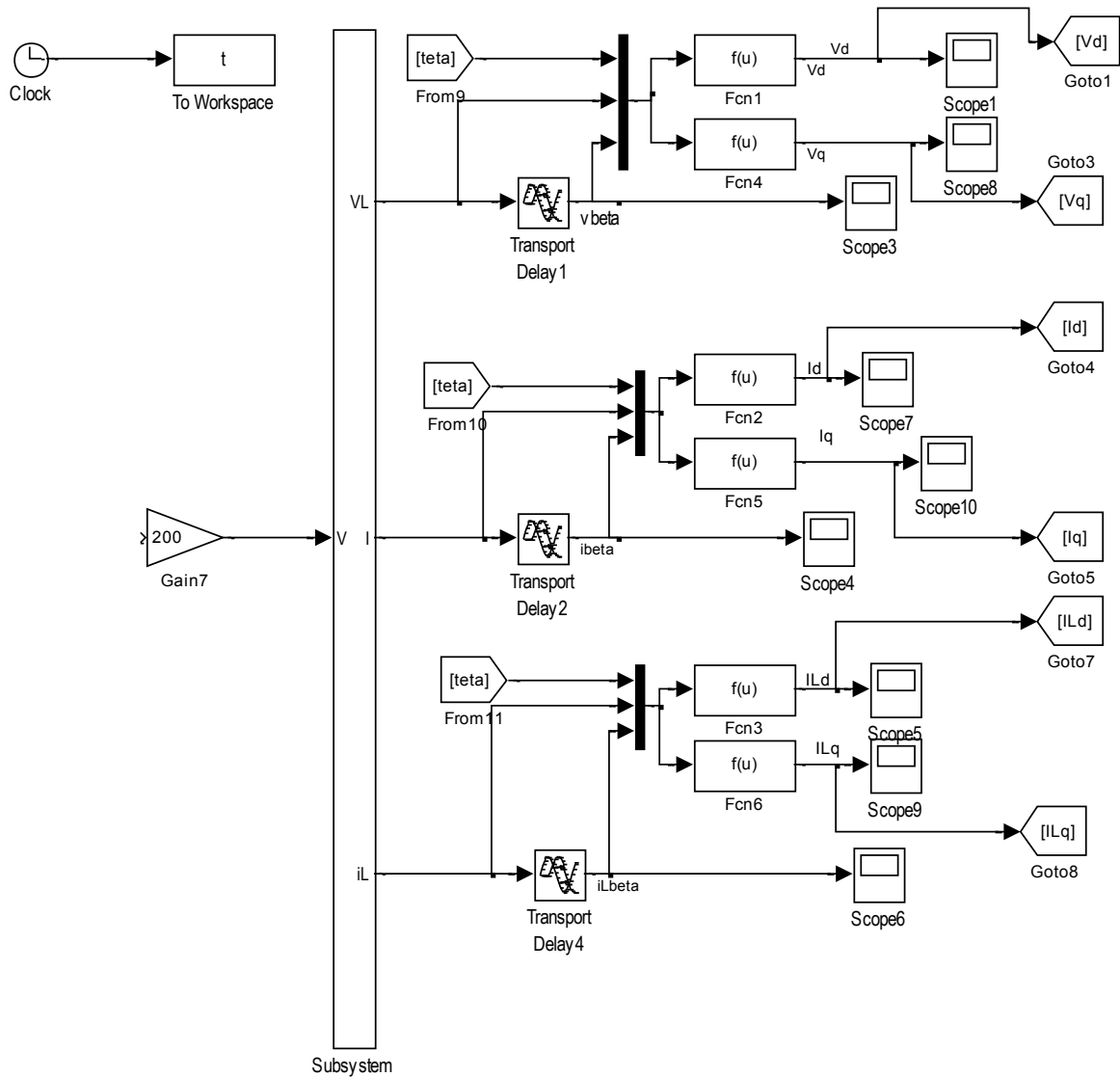
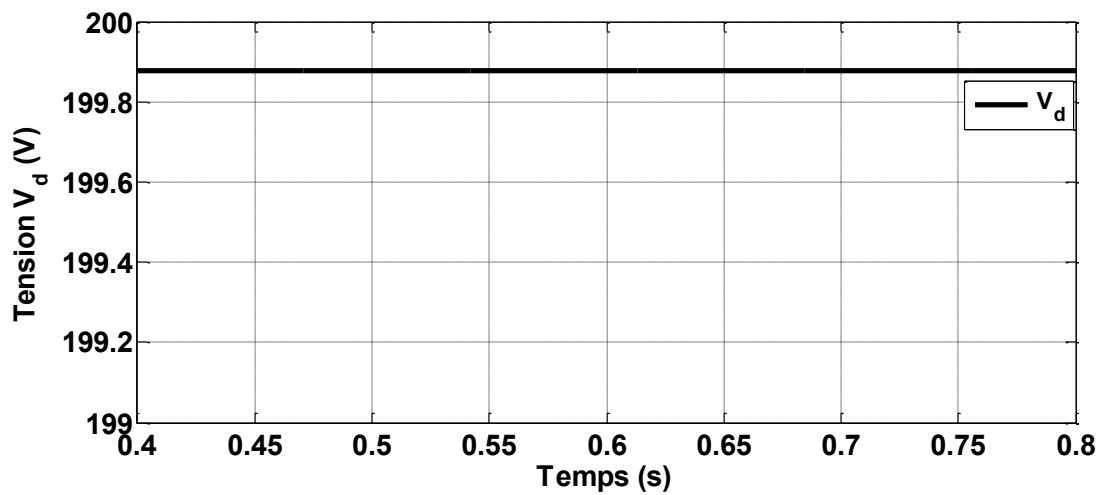
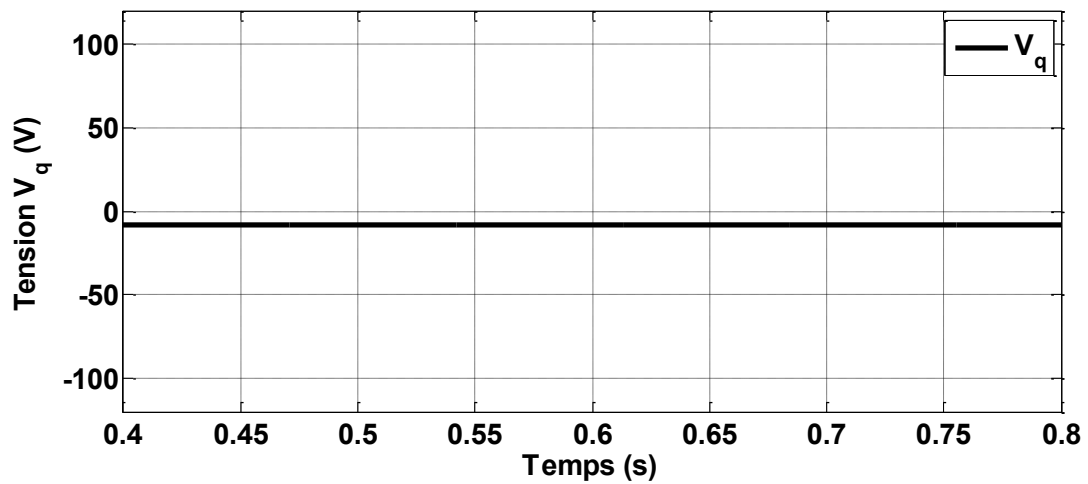
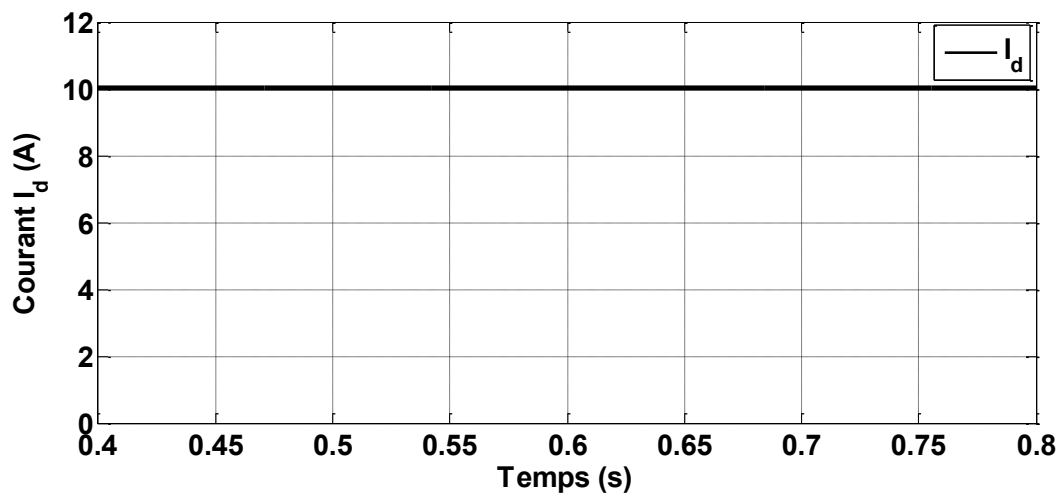
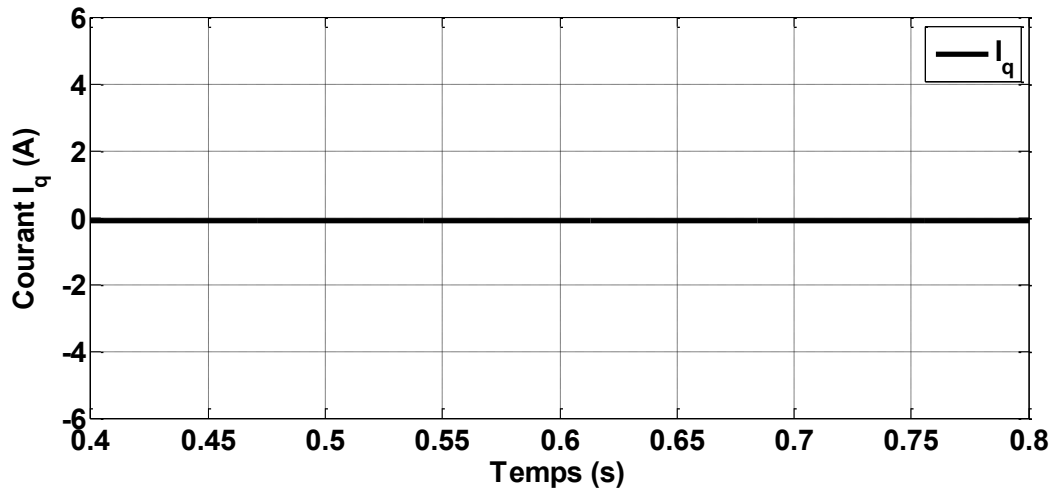
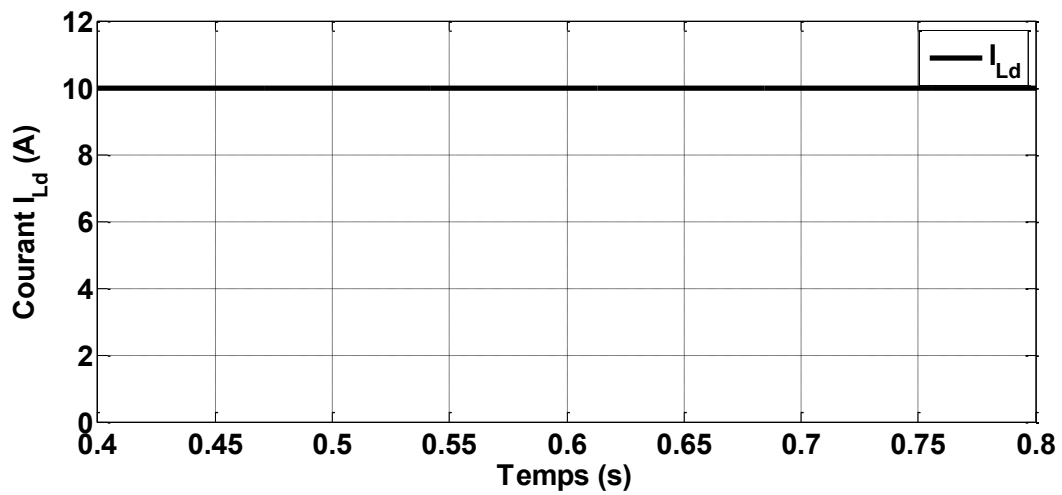
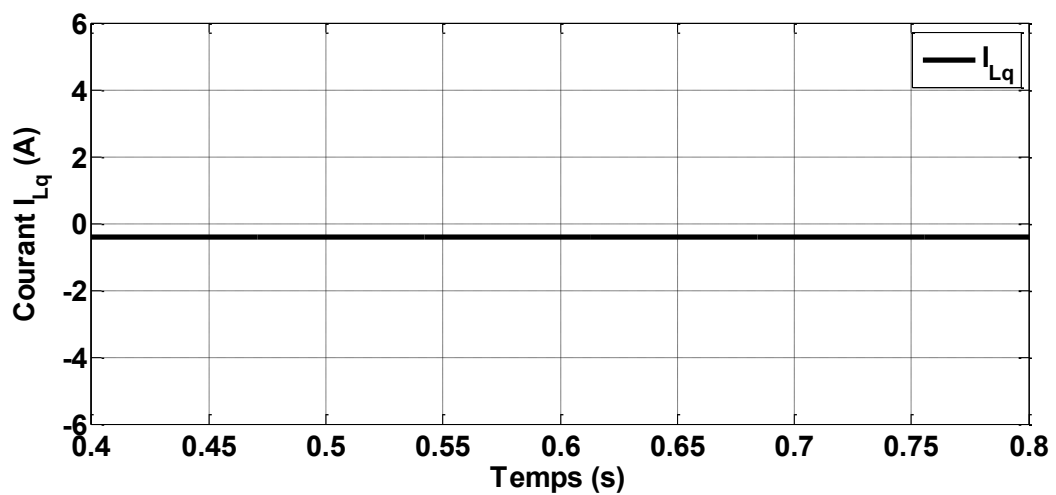


Figure V.8. Schéma de simulation pour l'obtention des composantes des courants et des tensions dans le plan (d,q) sous Matlab simulink

Les allures des courants et des tensions dans le plan (d,q) sont données par les figures (V.9) (V.10), (V.11), (V.12), (V.13) et (V.14).

Figure V.9. Allure de la tension  $V_d$ Figure V.10. Allure de la tension  $V_q$ Figure V.11. Allure du courant  $I_d$

Figure V.12. Allure du courant  $I_q$ Figure V.13. Allure du courant  $I_{Ld}$ Figure V.14. Allure du courant  $I_{Lq}$

**➤ Interprétation des résultats**

- On peut constater l'allure continue des tensions et des courants obtenus.
- L'amplitude de la tension de charge est plus proche de la référence.
- L'erreur statique est négligeable.

**V.5.Conclusion :**

- Au cours de ce chapitre, on a étudié une stratégie de commande dans le référentiel (d,q) afin de commander des variables continues.
- D'abord, on a créé la composante  $\beta$  afin d'obtenir le plan fixe  $(\alpha,\beta)$ , ensuite, en utilisant la transformation de park, on a créé le référentiel tournant (d,q).
- en utilisant la transformée de park et inverse de park, on a pu retrouver les expressions des tensions  $(V_d, V_q)$ , et des courants  $(I_d, I_q)$
- Pour commander le système, deux boucles sont utilisées, une boucle interne des courants, et une autre externe des tensions. La boucle des courants est plus rapide que celle des tensions, et pour la commande deux régulateurs proportionnels sont utilisés.
- L'implémentation et la simulation du système est fait sous l'environnement MATLAB (simulink).
- Les résultats de simulation ont montrés l'efficacité de la stratégie de commande (d,q) dans le suivi de la référence et de réduire l'erreur statique.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif principal des travaux réalisés au cours de ce mémoire s'articule sur le contrôle des convertisseurs statiques (DC-AC) monophasés destinés aux systèmes photovoltaïques autonomes.

Dans une première étape, un rappel sur les différentes ressources d'énergies renouvelable est présenté, en se focalisant sur l'énergie solaire photovoltaïque.

Ensuite on a présenté les différents composants du système photovoltaïque, ainsi que le principe de la conversion.

Puis on a étudié l'onduleur monophasé dans un réseau autonome alimentant une charge linéaire. Dans ce contexte, et dans le but d'assurer en sortie de la charge une tension de haute qualité, notamment, une onde quasi-sinusoïdale, d'abord, on a étudié l'ensemble onduleur-filtre LC, les résultats de simulation du système sous MATLAB SIMULINK ont montré un caractère oscillant du système, ensuite on a rajouté une résistance R en série avec le filtre afin d'amortir les oscillations. Le système est bien amorti. Cette méthode a l'avantage d'être simple et fiable, par contre l'adjonction d'un élément résistif augmente les pertes dissipées par effet Joule.

Afin de voir l'influence des perturbations sur l'onde de la tension de charge, le système perturbé est étudié, on a pu conclure qu'une perturbation influe directement en fréquence et en amplitude sur l'onde de la tension et du courant de charge.

Pour améliorer la qualité de la tension de sortie, deux méthodes d'amortissement sont proposées ; amortissement avec une résistance réelle et amortissement virtuel. En comparant les ondes des courants et des tensions obtenues après simulation, on a constaté un déphasage dû aux chutes de tension. Pour cela un système de régulation a été nécessaire. A cet effet un régulateur proportionnel, intégral est utilisé, ses paramètres sont déterminés par simulation, on a pu constater une erreur statique négligeable entre l'allure de la tension d'entrée et celle de sortie.

Afin d'améliorer les performances du système, une autre stratégie de commande est étudiée, elle propose le maintien des contrôleurs classiques tout en opérant un passage vers

un autre repère de référence, dans le plan (d q), pour parvenir à contrôler des variables continues et non alternatives.

Les résultats obtenus avec cette méthode ont conduit à des résultats satisfaisants en réduisant l'erreur statique.

**Comme perspectives nous proposons :**

- Dans cette étude la charge considérée est linéaire, une autre étude peut être faite pour une charge non linéaire.
- Une autre étude pourra être faite pour un onduleur monophasé destiné aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau

# **Bibliographie**

## Bibliographies

- [1] R. Mechouma, "Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques: Applications pour les charges commerciales" Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Batna, 2015
- [2] A. Houari, "Contribution a l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques" Thèse de Doctorat en Génie Electrique, 'Université de Lorraine, 2012
- [3] A.Saim, "Commande à base de descripteurs flous d'une architecture de génération distribuée" Thèse de Doctorat en Automatique, Université Mouloud Mammeri De Tizi ousou, 2017
- [4] H.Aboub, "Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV" thèse de Magister en électrotechnique, Université El-Oued, 2014
- [5] F.Kaddour , "Systèmes des énergies renouvelables et leurs intégrations dans les réseaux électriques", Doctorat en Génie Electrique, Université d'Oran, 2017
- [6] K. Hristiyan, "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 en Génie Électrique, Ecole Central de Lille, France, 2014.
- [7] <http://tpebiomasse.weebly.com/pour-leacutelectreacuteciteacute-et-le-chauffage.html>
- [8] O Rourke, F., Boyle, F., and Reynolds, A. " Tidal energy update 2009 ", Applied Energy, 87(2) :398-409, 2010.
- [09] S. Belakehal, "Conception & Commande des machines à aimant permanent dédiées aux énergies renouvelables", Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Constantine, 2010

- [10] CH. DARRAS, "Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre
- [11] B. Wafa, " Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque Adapté Par Une Commande MPPT ", Diplôme De Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla,2012
- [12] T. Nacer Eddine, G. Slimane, "Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque", Mémoire Master, Université Echahid Hama Lakhder D'el-Oued, 2015.
- [13] <http://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies.htm>,22/03/2017.
- [14] [http://www.ecosources.info/dossiers/Types\\_de\\_cellules\\_photovoltaiques](http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques) , 22/03/2017
- [15] I. Yassine, "Système Hybride Photovoltaïque – Eolien –Diesel Sans Stockage ", Projet De Fin D'études, Université Libanaise, 2013.
- [16] M. Med Nadjib, H. Charaf Eddine, " Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque En Fonctionnement Autonome Et Connecté Au Réseau", Mémoire Master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2013.
- [17] B. Mohammed, Mémoire DE Magister, " Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire De Magister, Centre Universitaire De Bechar, 2008.
- [18] M. Reda, " Modélisation D'un Dispositif Mppt Pour L'étude De L'augmentation De La Puissance Produite Par Les Générateur Photovoltaïques", Diplôme De Magister, Université Badji Mokhtar Annaba,2010.
- [19] M. Slama Fateh, "Modélisation D'un Système Multi Générateurs Photovoltaïques Interconnectés Au Réseau Electrique", Mémoire De Magister, Université Ferhat Abbas – Setif,2011.
- [20] B. Tarek, B. AMAR Radhia, "Etude D'un Système D'énergie Renouvelable Avec Système De Stockage", Diplôme De Master, Université D'el-Oued, 2014.

- [21] M.Abdelatif “Etude et simulation d’une UPS hybride” mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015
- [22] A.Elakkary “Systèmes Photovoltaïques raccordés au réseau électrique” article de conférence, Université Mohammed V –Rabat, 2015.
- [23] A. Hamadi, Contribution à l’étude des filtres hybrids de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l’énergie dans le réseau électrique de distribution. Thèse de doctorat de l’université du Québec (2010)

## Résumé

Les travaux réalisés au cours de ce mémoire, consistent à proposer des stratégies de contrôle d'un onduleur monophasé dédié aux applications photovoltaïques en présence d'une charge linéaire afin de maintenir une tension de sortie de haute qualité. A cet effet, dans un premier temps, on a modélisé puis simulé l'ensemble onduleur - filtre LC sous Matlab Simulink, les résultats obtenus ont montré un caractère oscillant des ondes du courant et de la tension de sortie. Ensuite, on a associé une résistance R en série avec le filtre LC, le système est bien amorti, L'atténuation passive est une méthode simple et efficace mais elle engendre des pertes d'énergie par effet joule dans le système. Afin d'améliorer les performances du système, deux méthodes d'amortissement réelle et virtuelle sont proposées, la comparaison des deux méthodes a conduit à un déphasage des ondes du courant et de la tension de sortie traduit par une erreur statique due aux chutes de tension. Dans le but de réduire cette erreur, un régulateur PI est introduit, les résultats obtenus par simulation ont montré une erreur statique négligeable. Afin d'éliminer cette dernière, Une autre stratégie de contrôle est étudiée, elle propose le maintien des contrôleurs classiques tout en opérant un passage vers un autre repère de référence (DQ), pour parvenir à contrôler des variables continues et non alternatives ce qui améliore les performances du système, notamment l'amplitude de la tension de sortie.

**Mots clés :** stratégie de contrôle, onduleur-filtre LC, amortissement virtuel, erreur statique, régulateur PI, repère DQ.