

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement

Supérieur et de la Recherche

Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie électrique

**Option**

*Réseaux électriques*

**Thème**

**Analyse des micro-réseaux électriques alimentés en courant continu**

**Présenté par:**

**BEDHOUCHE Zine-eddine**

**MAHLOUL Azedine**

**Encadré par :**

**Mr M.BOUTEBEL**

**Soutenu le : 22 Septembre 2020**

**Devant le jury composé de :**

**Président : Mr.HERZINE**

**Rapporteur :Mm.CHEKKAL**



## Remerciement

*Avant tout nous tenons à remercier Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail.*

*Nous remercions nos familles qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant toutes nos études.*

*Nous adressons notre reconnaissance à Mr M. BOUTEBEL d'avoir accepté de nous guider dans ce travail. Nous tenons à le remercier sincèrement pour sa disponibilité, sa gentillesse, et sa patience. Grâce à lui ce mémoire a pu être mené et réalisé dans d'excellentes conditions.*

*Nos remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur de juger ce travail.*

*Notre sincère gratitude va vers tous ceux qui ont participés de près ou de loin à ce travail.*





---



# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chers mère qui m'a guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, mes deux sœurs Hanane et Rafika qui ont été à mes côtés et m'on soutenu durant toutes ses années et mes tentes maternelles qui n'on jamais cesser de me soutenir.*

*Mes très chères cousins Fares, Mounir, Hilale, Houssam , Achor et Abdenour qui ont jouer fièrement le rôle de frères , sans oublier Réda et Bilale qui m'ont permis d'avoir confiance en moi et d'apprendre des chose que personne ne pourra me les apprendre.*

*Toute la famille **BEDHOUCHE** sans exception.*

*Mes grands parents que dieux les protège.*

*Tous mes camarades du groupe Réseaux Electriques et tout les enseignants.*

*Z.BEDHOUCHE*



---





---



# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.*

*Mes très chers frères sœurs ainsi que mes grands parents.*


*Toute la famille MAHLOUL sans exception.*

*Tous mes ami(e)s et toute la promotion 2019/2020, Électrotechnique.*

*A.MAHLOUL*



---



# **Table des matières**

# Tables des matières

---

Table des matières.....	1
Liste des figures .....	
Liste des tableaux .....	
Abréviation .....	
Liste des symboles .....	
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Généralités sur les Micro-Réseaux Electriques

I.1.Introduction .....	3
I.2.Historique des micro-réseaux .....	3
I.3.Définition d'un Micro-Réseau électrique .....	3
I.4.Fonctionnement d'un micro-réseau .....	4
I.5.Types de Micro-Réseau .....	4
I.5.1. Micro-Réseaux électriques alimenté en courant continu .....	4
I.5.2. Micro-Réseaux électrique alimenté en courant alternatif .....	5
I.5.4. Micro-Réseaux électriques multi vecteurs .....	5
I.5.5. Micro-Réseaux électriques autonomes .....	6
I.5.6. Micro-Réseaux électriques hybrides .....	6
I.6.Définition des différentes parties d'un micro-réseau électrique .....	7
I.6.1.Une installation de production d'énergie locale .....	7
I.6.1.1.Production décentralisée .....	7
a. Energie photovoltaïque .....	7
b. Energie éolienne .....	7
c. L'énergie géothermique .....	7
d. L'énergie biomasse .....	7
e. L'énergie hydraulique .....	7
I.6.1.2.Production centralisée .....	8
I.6.2. Système de stockage .....	8

## Tables des matières

---

I.6.2.1. Stockage avec pompage turbinage .....	8
I.6.2.2. Stockage par air comprimé .....	8
I.6.2.3. Stockage par volant d'inertie .....	8
I.6.2.4. Stockage avec l'hydrogène .....	10
I.6.2.5. Stockage avec batteries électrochimiques .....	10
I.6.2.6. Stockage avec batteries de circulation .....	10
I.6.2.7. Stockage électromagnétique .....	10
I.6.2.8. Stockage thermique (chaleur et froid).....	10
I.6.3. Système de gestion intelligente .....	11
I.6.3.1. Définition de gestion intelligente .....	11
I.6.3.2. Types de système de gestion intelligente .....	11
I.V.7. Avantages et inconvénients des Miro-Réseaux .....	12
a. Avantages.....	12
b. Inconvénients .....	13
I.7. Conclusion .....	14

## Chapitre II : Etude d'un Micro-Réseau Electrique Alimenté en Courant Continu

II.1. Introduction .....	15
II.2. Description des systèmes de production d'énergie électrique utilisés dans le micro-Réseau étudié .....	16
II.2.1. Photovoltaïque .....	16
II.2.1.1. Historique .....	16
II.2.1.2. Définition .....	16
II.2.1.3. Principe de fonctionnement .....	17

## Tables des matières

---

II.2.1.4. Types de cellules photovoltaïques .....	18
II.2.1.5. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque .....	18
II.2.1.6. Association de panneaux Photovoltaïques .....	22
a. Association série .....	22
b. Association parallèle .....	22
II.2.2. Piles à combustibles .....	32
II.2.2.1. Historique .....	24
II.2.2.2. Définition .....	24
II.2.2.3. Fonctionnement .....	24
II.2.2.4. Types de piles à combustibles .....	25
II.2.2.5. Piles à combustible de type PEM (Pile à membrane échangeuse de protons) .....	26
II.2.2.6. Structure interne du stack PEM .....	27
a. Plaques bipolaires .....	27
b. Couches de diffusion .....	27
c. Membrane .....	27
d. Electrodes .....	28
e. Refroidissement .....	28
f. Canal de distribution des gaz .....	28
II.2.2.7. Les éléments auxiliaires d'une pile à combustible PEM .....	28
II.2.2.8. Géométrie des Canaux de distribution des gaz .....	28
a. Canal en serpentin .....	28
b. Canal en serpentins parallèles .....	29



## Tables des matières

---

c. Canal mixte .....	29
d. Plot en carré ou grille .....	29
e. Structure Parallèle .....	30
f. Canaux discontinus .....	30
g. Canal en spiral .....	30
II.2.2.9. Caractéristique d'une pile à combustible .....	31
II.2.2.10. Les différentes équations caractérisant les piles à combustibles .....	31
a. Le travaille électrique .....	31
b. Le rendement .....	32
II.2.2.11. Système de commande d'une pile à combustible .....	32
II.2.2.12. Domaines d'applications des piles à combustibles .....	33
a. Application stationnaires .....	34
b. Applications mobiles sur autobus .....	34
c. Application pour Voitures .....	34
d. Applications portables .....	35
II.3 Conclusion .....	36

## **Chapitre III : Modélisation d'un Micro-Réseau Alimenté en Courant Continu**

III.1. Introduction .....	37
III.2. Les convertisseurs statiques utilisés dans la modélisation du Micro-réseau .....	38
III.2.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur) .....	38
III.2.1.1. Fonctionnement .....	38

## Tables des matières

---

III.2.1.2 Types de hacheurs .....	40
III.2.1.2 .a. Hacheur série ou bien dévolteur (abaisseur de tension).....	40
III.2.1.2 .b. Hacheur parallèle ou bien survolteur (élévateur de tension).....	40
III.2.1.2 .c. Hacheur réversible en courant.....	41
III.2.2.Convertisseur DC/AC (Onduleur).....	44
III.2.2.1.Définition et fonctionnement .....	44
III.2.2.2.Types d'onduleur utilisé .....	45
III.2.2.5. Commande d'un onduleur triphasé .....	45
a. Commande 120° (commande décalé) .....	45
b. Commande 180° (commande pleine onde) .....	46
c. Commande MLI .....	47
III.3. Systèmes de commande du micro-réseau étudié.....	48
III.3.1.Système de commande du Hacheur.....	48
III.3.1.1. Principe de la techniques MPPT .....	48
III.3.1.2. Différents algorithmes utilisés pour la réalisation du MPPT .....	48
a. Algorithme de la tension constante (CV, Constant Voltage) .....	48
b. Algorithme du Courant constant (Constant Current) .....	49
c. Algorithme Perturbation et Observation (P&O) .....	50
III.3.1.3. Les équation gouvernant la commande du Hacheur .....	50
III.3.1.4. Les équation gouvernant la commande de l'onduleur .....	51
III.3.2.Charge en courant alternatif du Micro-Réseau DC .....	53
III.4.Conclusion .....	55

### Chapitre IV: Simulation d'un cas pratique de Micro-Réseau DC

IV.1. Introduction .....	56
IV.2. Système global .....	57
IV.3.Simulation du système global avec MATLAB .....	58
IV.3.1. Alimentation d'une charge résistive .....	58
a. Etude de l'influence de la charge .....	58
b. Etude de l'influence de la tension .....	58
❖ Hacheur survolteur (BOOST).....	58
❖ Charge résistive .....	58
IV.3.2. Alimentation d'une charge DC .....	61

# Tables des matières

---

❖ Hacheur dévolteur (BUCK) .....	61
❖ Charge DC .....	61
IV.3.2. Alimentation d'une charge AC .....	64
❖ Onduleur triphasé.....	64
❖ Charge AC .....	64
IV.4.Conclusion .....	67
Conclusion Générale .....	68
Bibliographie .....	
Annexe .....	

## **Liste des figures**

## Liste des figures

---

Figure I.1 : Exemple d'un Micro-réseau à courant continue .....	4
Figure I.2 : micro-réseau alimenter en DC .....	5
Figure I.3 : Micro-Réseau alimenter en AC.....	5
Figure I.4 : Micro-Réseau électrique multi vecteurs .....	6
Figure I.5 : Micro-Réseaux isolés du grid .....	6
Figure I.6 :Micro-réseau hybride .....	7
Figure II.1: Principe de la conversion Photovoltaïque.....	16
Figure II.2 : principe de fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque .....	17
Figure II.3 : Circuit électrique équivalent d'une cellule Photovoltaïque.....	18
Figure II.4 : caractéristiques $I - V$ de cellule solaire en absence et présence d'éclairement. ....	19
Figure II.5 : Caractéristiques courant et puissance en fonction de la tension.....	20
Figure II.6 : Facteur de forme d'une cellule photovoltaïque .....	21
Figure II.7: Schéma du principe de branchement en série de panneaux Photovoltaïques.....	22
Figure II.8: Schéma du principe de branchement en parallèle de panneaux Photovoltaïques.....	22
Figure II.9 : Schéma du principe de branchement en série- parallèle de panneaux Photovoltaïques.....	22
Figure II.10: Caractéristique de l'association des panneaux Photovoltaïques.....	23
Figure II.11 : Principe d'une pile à combustible.....	24
Figure II.12: Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide .....	25
Figure II.13: Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique.....	25
Figure II.14: Principe d'une piles à combustible de type PEM .....	27
Figure II.15 : Élément de base d'une cellule élémentaire de pile PEM.....	27
Figure II.16 : Canal de distribution des gaz en serpentin .....	29
Figure II.17 : Canal de distribution des gaz en serpentin parallèles .....	29
Figure II.18 : Canal de distribution des gaz mixte en Serpentin Parallèle.....	30
Figure II.19: Canal de distribution des gaz Plot en carré ou grille .....	30
Figure II.20 : Canal de distribution des gaz Structure Parallèle .....	30
Figure II.21: Canaux de distribution des gaz discontinus.....	30
Figure II.22 : Canal de distribution des gaz en spirale .....	31

## Liste des figures

---

Figure II.23: Caractéristique d'une pile à combustible.....	31
Figure II.24 : Pile à combustible alimentant un Hacheur .....	32
Figure II.25: Application stationnaire.....	34
Figure II.26: Pile à Application pour autobus.....	34
Figure II.27: Application pour voiture.....	35
Figure II.28: Application portable d'une pile à combustible.....	35
Figure III.1 : Schéma de principe d'un Hacheur.....	38
Figure III.2 : Transistor IGBT .....	38
Figure III.3 : Caractéristique statique d'un IGBT.....	39
Figure III.4: Cellule de commutation type Hacheur .....	39
Figure III.5: Montage d'un Hacheur série .....	40
Figure III.6: Allure de courant/tension d'un Hacheur série débitant sur charge R.....	41
Figure III.7: Montage d'un Hacheur parallèle .....	41
Figure III.8 : Allure de courant/tension d'un Hacheur Parallèle débitant sur charge R .....	43
Figure III.9: Montage d'un Hacheur réversible en courant .....	43
Figure III.10: Allure de courant/tension d'un Hacheur réversible en courant.....	44
Figure III.11: Schéma de principe d'un Onduleur .....	44
Figure III.12 : Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé.....	45
Figure III.13: Commande $120^\circ$ .....	46
Figure III.14: Commande $180^\circ$ .....	46
Figure III.15: Les Formes d'onde des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasée avec la charge $RL$ montée en étoile (commande $180^\circ$ ) .....	47
Figure III.16: Organigramme de la méthode Perturbation et Observation .....	50
Figure III.17: Système de commande du Hacheur.....	51
Figure III.18: Système de commande de l'onduleur.....	53
Figure III.19: Système du filtre LC.....	54
Figure IV.1: Le schéma théorique du système global du Micro-Réseau étudié .....	57
Figure IV.2: Allure de la tension de la charge R (cas a).....	59
Figure IV.3: Allure du courant de la charge R (cas a).....	69
Figure IV.4: Allure de la tension de la charge R (cas b).....	60
Figure IV.5: Allure du courant de la charge R (cas b).....	60
Figure IV.6: Allure de la tension de la charge DC (cas a).....	62
Figure IV.7: Allure du courant de la charge DC (cas a) .....	62
Figure IV.8: Allure de la tension de la charge DC (cas b).....	63

## Liste des figures

---

Figure IV.9: Allure du courant de la charge DC (cas b).....	63
Figure IV.10: Allure de la tension de la charge AC (cas a).....	64
Figure IV.11: Allure du courant de la charge AC (cas a). ....	65
Figure IV.12: Allure de la tension de la charge AC (cas b).....	65
Figure IV.13: Allure du courant de la charge AC (cas b). ....	66

## **Liste des tableaux**



## Liste des tableaux

---

Tableau II.1 : Différents types de piles à combustible.....	26
---	----

## **Abréviations**

## Abréviations

---

A : Ampère

AC : Alternating Current

AFC : Alkaline fuel Cell (pile à combustible alcaline)

C : Condensateur

CC : Courant Continu.

CdS : Cadmium Sulfure (sulfure de cadmium)

CdTe : Cadmium Telluride (tellurure de cadmium)

Cf : Condensateur du filtre

CV : Constante Voltage

d et q : Paramètres de sortie de la transformée abc vers dq0

D : Diode

DC : Direct Current

DMFC : Direct Methanol Fuel Cell (pile à combustible au méthanol direct)

E : Energie

Ea : potentiel de l'anode

Ec : potentiel de la cathode

F : constante de faraday

FF : Facteur de Forme

GaAs : Gallium Arsenide (arséniure de gallium)

GDL : Gas Diffusion Layer (couche de diffusion de gaz)

Ge : Germanium

GPV : Générateur Photovoltaïque

GSM: Global System for Mobile (*Système mondial pour les communications mobiles*)

GTO : Gate Turn-Off Thyristor (thyristor à extinction par la gâchette)

I : Intensity (courant)

i0 : Courant de la charge

I<sub>cc</sub>: courant de court circuit

IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée)

i<sub>L</sub> : Courant de l'inductance du filtre

I<sub>obs</sub> : courant produit à l'obscurité

I<sub>opt</sub> : courant optimal

I<sub>ph</sub>: courant produit par les photons

I<sub>ref</sub> : courant de référence

I<sub>s</sub> : Courant de sortie

I<sub>s</sub>: courant de saturation

K : constante

K<sub>p</sub> : Constante du proportionnel

K<sub>i</sub> : Constante de l'intégrateur

kWh : Kilos Watt Heurs

L : inductance

## Abréviations

---

Lf : inductance du filtre

LTE : *Long Term Evolution*

MCFC : Molten carbonate Fuel Cell (pile à combustible au carbonate fondu)

MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion

MPP : Maximum Power Point (point de puissance maximale)

MPPT : Maximum Power Pointer Tracking (suivis du point de puissance maximale)

N : Négative

n : nombre de mole

np: nombre de cellules en parallèle

ns: nombre de cellules en série

P : Positive

Pe : Puissance électrique

P&O: Perturbation et Observation

PAC : Pile A Combustible

PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell (pile à combustible à l'acide phosphorique)

PEM : Proton Exchange Membrane (pile à membrane échangeuse de protons).

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel- Cell (pile à combustible a membrane échangeuse de proton)

Ps : Puissance de sortie

PV : Panneau photovoltaïque

q : charge

R : Résistance

Rf : Résistance du filtre

Se : Sélénium

Si : Silicium

SiO<sub>2</sub>: Dioxyde Silicon (dioxyde de silicium)

SOFC : Solid Oxid Fuel Cell (pile à combustible à oxyde solide)

T : température absolue

Us : tension de sortie

V<sub>opt</sub> : tension optimale

V: Volt

V: Voltage (potentiel)

V0 : Tension de l'entrée du filtre

Vc : Tension aux bornes de la capacité (voltage capacitor)

V<sub>co</sub> : Tension de circuit ouvert

Vdc : Voltage direct current

V<sub>ref</sub> : tension de référence

V<sub>th</sub>: Potentiel thermique

W : Watt

Wélec : Work électric (travaille électrique)

## **Abréviations**

---

Wénerg : Travail énergétique

WiMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access (communication sans fil à large bande)

## **Liste des symboles**

## Liste des symboles

---

$\eta$  : Rendement  
 $\Delta$ : Opérateur delta  
 $\Delta G$ : Variation d'enthalpie libre  
 $\Delta H$  : Energie chimique  
 $\Delta V$  : Variation de tension  
 $\alpha$ : Angle de commande ou d'amorçage  
 $\pi$ : Constante pi = 3.14  
 $\emptyset$ : Flux de tension  
 $\theta$ : Angle de tension  
W: Vitesse de pulsation

# **Introduction générale**



## Introduction générale

---

L'énergie électrique est l'élément indispensable dont l'humanité ne peut pas s'enpasser, elle représente la base de tous les domaines. De nos jours la participation à son développement est devenu un défi mondial.

Au début de son apparition il ya des siècles, elle à permis de donner un aspect positif pour la planète ainsi que pour l'humanité entière. Avec l'avancée technologique, des études approfondies ont permis de démontrer l'aspect négatif de son utilisation anarchique qui a fortement impacté l'environnement et l'espèce vivante.

La forte consommation de l'énergie fossile dont le charbon, gaz, carburants et mêmes le nucléaire dans le but de produire de l'énergie électrique à provoqué la dégradation de notre planète à cause de l'augmentation des rejets toxiques et des déchets nuisibles pour l'environnement. Le passage à une énergie propre est devenu l'une des priorités absolue des chercheurs dans le but de régler certains impacts négatifs concernant sa production.

A partir de là que l'énergie renouvelable est apparu; elle à permis de réduire la consommation de l'énergie fossile en passant à l'exploitation des ressources naturelles qui ne représentent aucun risque pour l'environnement dont le Photovoltaïque, l'éolien, l'hydraulique...etc.

L'énergie Photovoltaïque est l'énergie la plus efficace du fait qu'elle est la seule capable de produire l'énergie électrique par conversion directe de l'énergie primaire véhiculé dans les rayonnements solaire.

Vue la forte croissance de la demande en énergie; l'énergie renouvelable est insuffisante pour couvrir cette forte demande. La recherche de méthodes permettant de mieux les exploiter à permis aux chercheurs d'élaborer un moyen efficace appelé le Micro-Réseau.

Le concept fondamental d'un « microréseau » se résume ainsi: un *intégrée système* d'énergie comprenant des sources d'énergie réparties et des multiples charges électriques fonctionnant comme un seul réseau autonome soit en *parallèle* ou « *îloté* » de l'actuel réseau d'alimentation publique [1].

La conception de Micro-réseau à partir du Photovoltaïque nécessite l'utilisation des convertisseurs statique du fait que l'énergie produite est en courant continu tel que les Hacheurs pour alimenter les récepteurs CC (courant continu) ainsi les Onduleurs car la majorité des récepteurs sont on CA (courant alternatif). L'avantage principal des Micro-Réseaux est la réduction du coût production-transport, mais aussi réduire la pollution; par contre l'inconvénient réside dans le coût élevé des technologies utilisées dans leurs exploitations, les pertes causées par les convertisseurs statiques et la difficulté rencontrée dans la réalisation de la stabilité au niveau de tout le système d'une manière générale.

L'utilisation de Micro-Réseau nécessite la présence d'un système de consommation intelligent afin de réaliser une consommation optimale de l'énergie en éliminant toute consommation inutile, mais aussi un système de stockage qui permettra de récupérer l'énergie produite non consommée pour une utilisation ultérieure.

A cet effet, dans ce mémoire nous allons analyser le comportement d'un Micro-Réseau alimenté en courant continu pour des modes d'exploitation variés.

Ce Mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous allons décrire brièvement les Micro-Réseaux électriques, les différents types de source d'énergie renouvelable ainsi de donner un aperçu sur les sources d'énergies fossiles.

Ensuite, dans le deuxième chapitre on va détailler sur l'énergie Photovoltaïque qui représente la source DC alimentant le Micro-Réseau étudié ainsi que les piles à combustibles qui jouent le rôle de stockage.

## Introduction générale

---

Dans le troisième chapitre; on décrira les convertisseurs statiques utilisés dans les conversions DC/DC et DC/AC, les différents systèmes de commandes et les équations gouvernant le Micro-Réseau étudié.

Enfin, dans le quatrième chapitre on va procéder à la simulation d'un cas réel d'un Micro-Réseau tout en interprétant les résultats obtenus et citer quelques avantages et inconvénients de leur utilisation.

# **Chapitre I: Généralités sur les Micro- Réseaux Electriques**

# **Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques**

---

## **I.1.Introduction :**

Les micro-réseaux sont des ensembles de sous-systèmes permettant de réaliser différentes tâches dont la production d'énergie au niveau locale , le stockage et la gestion intelligente afin d'optimiser la consommation, produire uniquement la quantité d'énergie nécessaire en se basant sur les sources d'énergie renouvelable afin de réduire les pertes, le transport d'énergie inutile et les frais supplémentaires. Ils sont conçus principalement dans le but d'éliminer au maximum possible toute source de production polluante.

Dans ce chapitre, nous allons en premier lieu parler sur l'historique les micro-réseaux, donner leurs définitions et citer leurs fonctionnements avec les parties principales qui les constituent en générale suivis par leurs types en se référants à des exemples.

Ensuite, on va citer les différents types de source de production d'énergie électrique, en d'autre terme les centrales de production se basent en grande partie sur l'énergie renouvelable sous toutes ses formes et en faible partie sur l'énergie fossile.

Enfin, on détaillera sur les différentes parties qui constituent les micro-réseaux en donnant des définitions, principes de fonctionnement et les éléments constitutifs de chaque partie concernant la production, stockage et gestion de l'énergie électrique.

## **I.2.Historique des micro-réseaux :**

Les micro-réseaux ont une longue histoire. En fait, la première centrale électrique de Thomas Edison construite en 1882 - la Manhattan Pearl Street Station - était essentiellement un micro-réseau car notre réseau centralisé n'était pas encore établi. En 1886, l'entreprise d'Edison avait installé 58 micro-réseaux à courant continu. Peu de temps après, cependant, l'évolution de l'industrie des services électriques a évolué vers un marché monopolistique réglementé par l'État, supprimant les incitations au développement de micro-réseaux [1].

## **I.3.Définition d'un Micro-Réseau électrique :**

Un micro-réseau est une version réduite d'un réseau électrique classique. Son énergie est fournie directement à un groupe d'utilisateurs au départ d'une production locale. C'est un sous-système qui n'est connecté au réseau général qu'en un seul point. Cette connexion agit comme un interrupteur qui permet de débrancher le micro-réseau du réseau public. En cas de panne, il peut temporairement fonctionner de façon autonome [2]. Comme le montre la figure I.1 :

# Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques

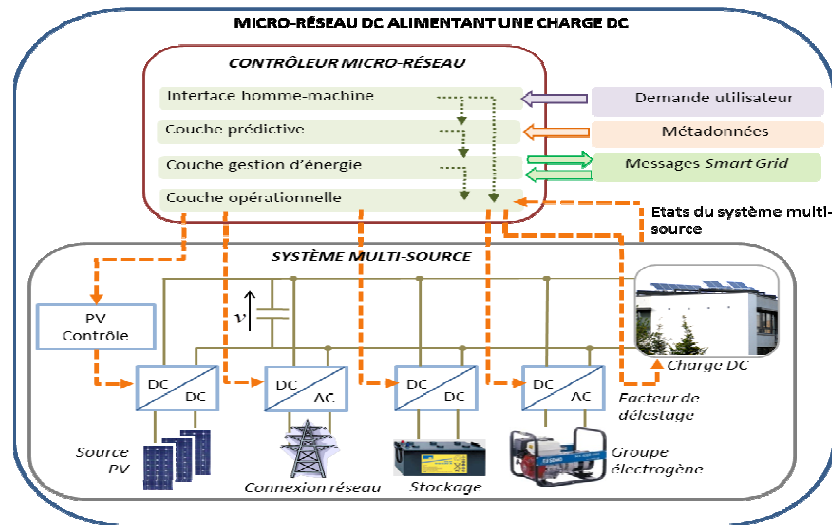


Figure I.1: Exemple d'un Micro-Réseau à courant continu [3].

## I.4. Fonctionnement d'un micro-réseau :

Le fonctionnement d'un micro-réseau nécessite la présence des 3 éléments essentiels suivants :

- ❖ une installation de **production d'énergie locale** pour assurer son autonomie en cas de déconnexion du réseau public (panneaux photovoltaïques, éoliennes, cogénération, pompe à chaleur, centrale biomasse, turbine hydro-électrique) et, en plus, un système de production de secours (groupe électrogène). En théorie, les micro-réseaux peuvent être complètement déconnectés du réseau.
- ❖ un **système de stockage** : batteries, réserve d'eau pour pompage-turbinage et dans l'avenir, super condensateurs et stockage chimique de chaleur latente.
- ❖ un **système de gestion intelligente** pour assurer l'équilibre constant entre production et demande d'électricité [2].

## I.5. Types de Micro-Réseau :

### I.5.1. Micro-Réseaux électriques alimenté en courant continu :

C'est un micro-réseau qui utilise le courant continu comme énergie primaire, généralement l'énergie provenant des centrales photovoltaïques, les piles à combustibles, mais aussi les centrales utilisent les machine DC (Direct Current) comme système de production.

# Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques

Dans le cas d'un bâtiment tertiaire, nous notons également qu'il est possible d'alimenter des installations et des appareils électriques directement en DC. Ainsi, dans le but d'éliminer les conversions énergétiques multiples pour certains appareils et afin de profiter de la génération [3].comme le montre la figure I.2 :

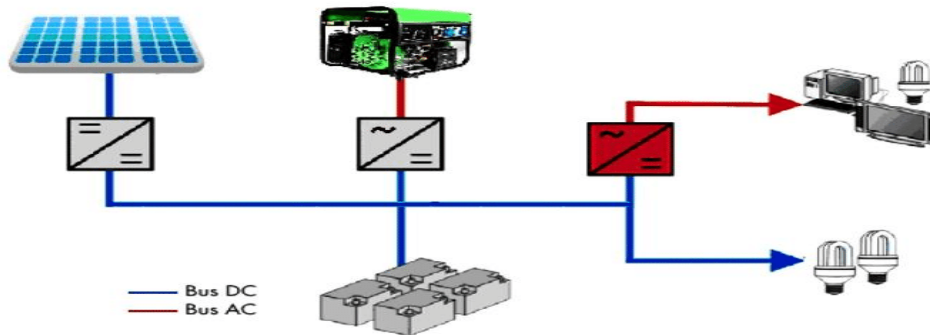


Figure I.2 : micro-réseau alimenté en DC [4].

## I.5.2. Micro-Réseaux électrique alimenté en courant alternatif :

C'est un micro-réseau qui utilise le courant alternatif comme énergie primaire, généralement l'énergie provenant des groupes électrogènes et des centrales utilisent les machines AC comme système de production [3].comme le montre la figure I.3 :

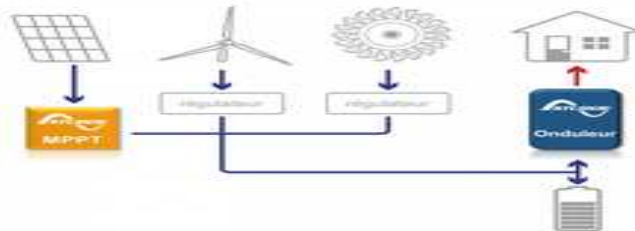


Figure I.3: Micro-Réseau alimenté en AC [5].

## I.5.4. Micro-Réseaux électriques multi vecteurs :

On distingue deux grandes catégories de micro-réseaux : les **micro-réseaux connectés au « grid »** (réseau principal), et les **micro-réseaux isolés du « grid »**. Dans les deux cas, l'introduction d'énergies renouvelables est une priorité. Pour les micro-réseaux connectés, il est impératif de développer la **flexibilité**, qui permet de gérer localement la variabilité des énergies renouvelables, optimiser la facture et contribuer à une plus grande **autonomie des territoires**. Cette flexibilité peut être mise à contribution à plus grande échelle pour aider les réseaux de distribution à gérer l'intermittence [6]. Voir les figures I.4:

## Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques

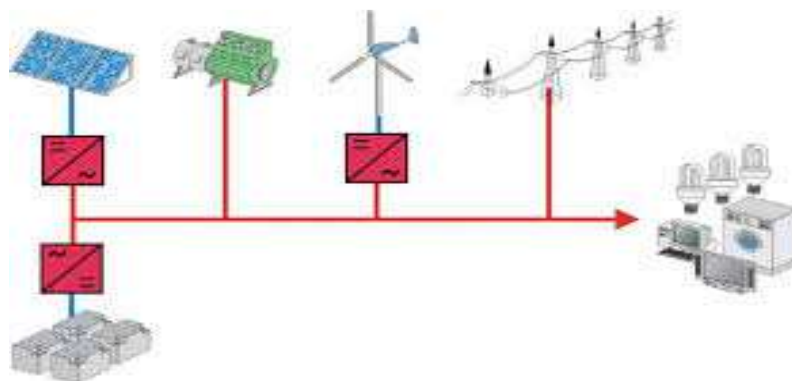


Figure I.4 : Micro-Réseau électriques multi vecteurs [7].

### I.5.5. Micro-Réseaux électriques autonomes :

Ce type de micro-réseau est indépendant du réseau national c'est-à-dire l'énergie primaire nécessaire pour la production n'est pas extraite du réseau, mais elle est produite localement au niveau du micro-réseau sous toute ces formes. C'est le même cas avec le micro-réseau isolé du réseau public (grid). Voir la figure I.5:

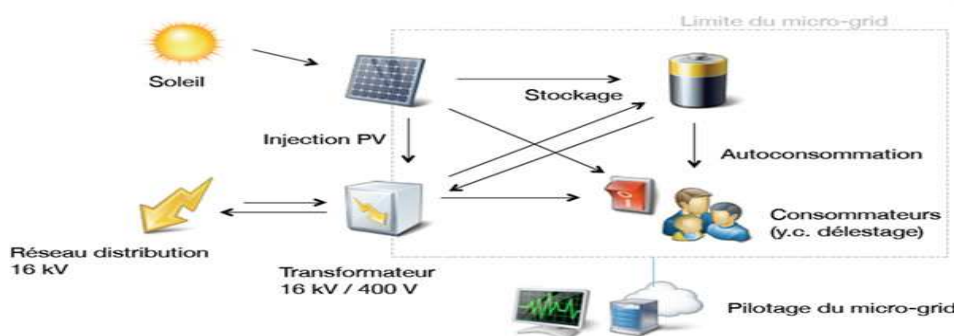


Figure I.5 : Micro-Réseaux isolés du grid [8].

### I.5.6. Micro-Réseaux électriques hybrides :

Sont des systèmes de production et de distribution de l'énergie électrique à un certain nombre de consommateurs par le biais d'un réseau de distribution indépendant au réseau national de distribution. Les micro-réseaux hybrides sont ceux qui combinent au moins deux technologies pour la production d'énergie et, en général, utilisent du carburant diesel comme source d'énergie primaire et une source d'énergie renouvelable auxiliaire. Ils sont considérés comme une solution technologique pour la production d'énergie rentable et fiable adaptée à l'approvisionnement de l'électricité pour les services de base. Dans les pays où le réseau national ne couvre pas les vastes zones rurales, où les pannes et les interruptions sont fréquentes en continu, les micro-réseaux peuvent fournir un service de qualité [9]. La figure I.6 illustre un micro-réseau hybride:

# Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques

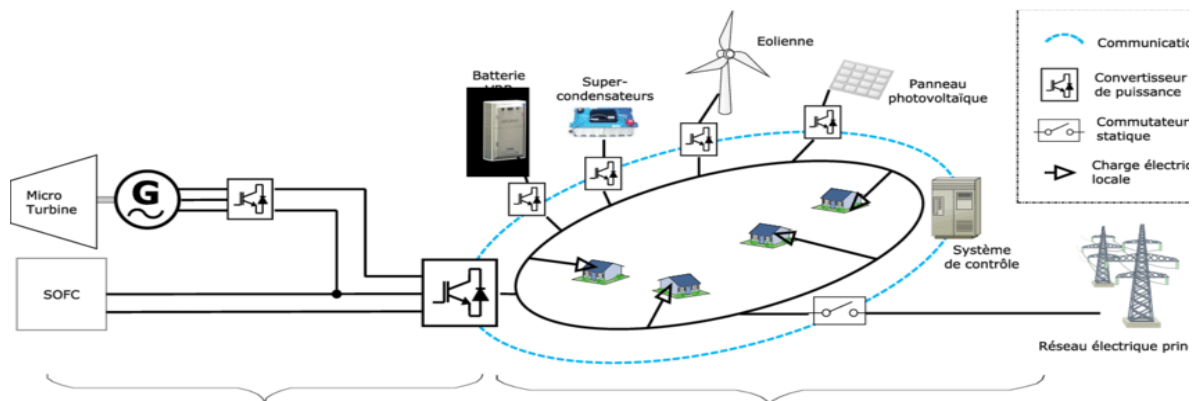


Figure I.6 :Micro-réseau hybride [10].

## I.6. Définition des différentes parties d'un micro-réseau électrique :

Elle est composée de trois grandes parties qui sont les suivantes :

### I.6.1. Une installation de production d'énergie locale :

Ce sont les différentes sources de production décentralisées qui constituent la partie importante et la source de production centralisée qui constitue la partie moins importante c'est le groupe électrogène utilisé comme secouru en cas de besoin.

#### I.6.1.1. Production décentralisée :

Ce sont les différentes centrales de production utilisant les sources d'énergie renouvelables tel que :

##### a. L'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Conversion de l'énergie cinétique du vent. Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le

##### b. L'énergie géothermique :

Le principe de la géothermie consiste à prélever l'énergie gratuite contenue dans le sol sous forme de chaleur.

##### c. L'énergie biomasse :

Une centrale électrique à biomasse produit de l'électricité et de la chaleur par combustion de la biomasse dans une chaudière. Les types les plus communs de chaudières sont des chaudières à eau chaude et des chaudières à vapeur.

##### d. L'énergie hydraulique :

Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. La puissance produite dépend de la chute et du débit d'eau. Ce type de production présente comme avantages la gratuité de l'énergie primaire et l'absence de pollution envers l'environnement.



# Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques

---

Les inconvénients principaux sont le prix élevé de l'investissement initial.

## **I.6.1.2. Production centralisée :**

Elle représente l'énergie électrique produite par les systèmes utilisant l'énergie fossile (gaz, pétrole, charbon, fioul...etc) comme énergie primaire, on peut prendre comme exemple les groupes électrogènes.

- les groupes électrogènes diesel sont les plus souvent utilisés dans les micro-réseaux.

**I.6.2. Système de stockage :** batteries, réserve d'eau pour pompage-turbinage et super-condensateurs et stockage chimique de chaleur latente.

### **I.6.2.1. Stockage avec pompage turbinage :**

Cette méthode consiste à pomper de l'eau d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, le pompage se fait durant les heures creuses (stockage), le turbinage se fait durant les heures de pointes (production).

### **I.6.2.2. Stockage par air comprimé :**

Utilisation de l'électricité disponible à bas coût en période de faible consommation, à stocker de l'air dans des cavités souterraines (ancienne mine de sel ou caverne de stockage de gaz naturel) grâce à un compresseur.

Au moment de la pointe de consommation, cet air comprimé est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent ainsi de l'électricité [17].

### **I.6.2.3. Stockage par volant d'inertie:**

Le principe du volant d'inertie permet aujourd'hui de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique.

Un volant d'inertie est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique.

L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8 000 et 16 000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente.

L'électricité est donc stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie [17].

## Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques

---

### I.6.2.4. Stockage avec l'hydrogène :

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation

$2 \text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Cet hydrogène est en suite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.

Ensuite, il existe trois moyens différents pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké :

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible.
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation. Ce gaz peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz existant mais surtout être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité.
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité [17].

### I.6.2.5. Stockage avec batteries électrochimiques :

Les batteries électrochimiques sont conçues par empilement de disques composés de différents types d'éléments chimiques. Il existe ainsi des batteries plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, lithium-air, sodium-soufre, chlorure de sodium...etc.

L'empilement est en suite relié à un système d'électronique de puissance qui, lors de la décharge, convertit le courant continu des batteries en courant alternatif à la tension, la fréquence et la puissance voulues. Ce système est aussi utilisé dans le sens inverse pour recharger les batteries.

Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours) [17].

### I.6.2.6. Stockage avec batteries de circulation :

Dans les systèmes de stockage par batteries à circulation, deux électrolytes liquides contenant des ions métalliques (couples d'ions métalliques zinc/brome, polybromure/ polysulfure de sodium et vanadium/vanadium), séparés par une membrane échangeuse de protons, circulent à travers des électrodes. L'échange de charges permet de produire ou d'absorber l'électricité.

## **Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques**

---

La puissance produite ou absorbée est dépendante du dimensionnement de la membrane d'échange et des électrodes, tandis que l'énergie stockée est dépendante du volume des électrolytes [17].

### **I.6.2.7. Stockage électromagnétique :**

Le principe des super-capacités repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). A la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction.

L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée.

La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts [17].

### **I.6.2.8. Stockage thermique (chaleur et froid) :**

Les installations de stockage thermique (chaleur et froid) concernent majoritairement les marchés industriels et tertiaires avec des réalisations de l'ordre de 1 à 10 MW, les réseaux de chaleur, et le marché résidentiel par le biais des ballons d'eau chaude sanitaire (ECS).

Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Sur les réseaux de chaleur, le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants.

Le stockage de chaleur dans les ballons d'eau chaude sanitaire mobilise aujourd'hui un parc de plusieurs millions d'installations, ce qui représente un appel de puissance de plusieurs gigawatts au maximum. Cet appel de puissance est prédictible et commandable, ce qui permet de décaler cet appel de puissance de manière programmée [17].

### **I.6.3. Système de gestion intelligente :**

#### **I.6.3.1. Définition de gestion intelligente :**

Assurer l'équilibre entre production et demande d'électricité, afin d'éliminer toutes consommations inutiles.

# Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques

---

Les réseaux intelligents peuvent être définis selon des caractéristiques en matière de :

- **Autonomie** : les micro- réseaux permettent à la génération, au stockage et aux charges de fonctionner de manière transparente et autonome, en équilibrant les problèmes de tension et de fréquence avec les avancées technologiques récentes.
- **Stabilité**: les approches de contrôle sont basées sur les baisses de fréquence et les niveaux de tension à la borne de chaque appareil, permettant à l'ensemble du réseau de fonctionner de manière stable, que la plus grande grille soit en hausse ou en baisse.
- **Compatibilité**: les micro-réseaux sont entièrement compatibles avec le réseau centralisé existant, servant d'unité fonctionnelle qui aide à construire le système existant, contribuant ainsi à maximiser les actifs des services publics autrement bloqués.
- **Flexibilité**: les taux d'expansion et de croissance n'ont pas à suivre de prévisions précises, car les délais sont courts et les montages progressifs. Ils sont également neutres sur le plan technologique, capables d'exploiter un mélange diversifié de carburants renouvelables et fossiles.
- **Évolutivité**: les micro-réseaux permettent de nombreux petits appareils de génération, de stockage et de chargement de manière parallèle et modulaire afin de passer à des niveaux de production et / ou de consommation d'énergie plus élevés.
- **Efficacité**: les objectifs de gestion de l'énergie - y compris économique et environnementale - peuvent être optimisés de manière systématique.
- **Économie**: les techniques de contrôle de la fréquence de retombée permettent de programmer la prise de décision économique dans des protocoles d'exploitation standard.
- **Modèle d'égal à égal**: les micro-réseaux représentent un nouveau paradigme, un véritable modèle d'égal à égal qui ne dicte pas la taille, l'échelle, le nombre d'homologues ou les taux de croissance [1].

## 1.6.3.2.Types de système de gestion intelligente :

Plusieurs configurations pouvant être réalisé, tout dépend celons les technologies de communications utiliser dans sa conception.

### ➤ Technologie Zigbee :

Dans les technologies de communication sans fil, Zigbee est utilisé relativement peu de puissance, de coût, de taux de transfert de données et complexité. Zigbee utilisé dans le réseau intelligent pour l'automatique conférence des compteurs, domotique et surveillance de l'énergie [24].

### ➤ Maillage sans fil :

Un réseau maillé sans fil est une combinaison de nœuds qui sont réunis dans les groupes et qui travaillent de manière autonome routeur. Les propriétés d'auto-guérison de ces nœuds sont une aide complète pour un signal de communication afin de trouver un itinéraire à travers actif nœuds.

# Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques

---

Les infrastructures du réseau maillé sont décentralisées car chaque nœud envoie des informations au nœud suivant.

Le maillage sans fil utilisé dans les petites entreprises et régions éloignées pour des connexions abordables.

## ➤ GSM

Le GSM est le système global de communication mobile utilisé pour transférer des données et des services vocaux. Le GSM est une technologie cellulaire qui connectait le téléphone mobile au réseau cellulaire.

## ➤ Communication par réseau cellulaire :

Les réseaux cellulaires sont utilisés pour créer un chemin dédié pour l'infrastructure de communication pour activer le déploiement du compteur intelligent sur une grande zone.

Différentes technologies de réseaux cellulaires telles que 2G, 2.5G, 3G, WiMAX et LTE sont utilisées pour partager des données entre le compteur intelligent et les données de l'unité centrale [28].

### I.V.7. Avantages et inconvénients des Micro-Réseaux :

#### a. Avantages:

- ✓ Garantir la continuité de service avec la génération d'énergie locale.
- ✓ Assurer la disponibilité d'une bonne qualité d'énergie tout en maintenant la qualité, la stabilité et la sécurité électrique.
- ✓ Avoir assez de puissance à fin de répondre à la demande tout en équilibrant l'offre du réseau central, la production locale et la gestion de la charge.
- ✓ La proximité entre la consommation et la production permet d'optimiser l'acheminement de l'énergie dans le but de réduire les pertes.
- ✓ Récupération de l'énergie thermique résultante de la production de l'énergie électrique pour une grande variété de besoins thermiques (chauffages, vapeur...etc).
- ✓ Réduire la dépendance du réseau central grâce aux systèmes de gestion intelligents.
- ✓ Limiter les investissements dans les réseaux de transport et de distribution.
- ✓ Intégrer les énergies renouvelables sur les réseaux pour éviter l'installation de centrales thermiques.
- ✓ Stockage de l'énergie pour l'utilisation en cas de besoin.
- ✓ Réduire les émissions de gaz polluants.

#### b. Inconvénients:

- ✓ Le contrôle selon les normes acceptables des trois principaux paramètres : la tension, la fréquence et la qualité d'alimentation.
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique qui nécessite beaucoup d'espace et de maintenance.
- ✓ La synchronisation avec le réseau électrique est difficile.
- ✓ Le dimensionnement des protections est plus difficile par rapport aux réseaux standards.
- ✓ Les normes d'interconnexions doivent être développées pour assurer la cohérence.
- ✓ Résolution des défis des énergies renouvelables (intermittence, localisation des sites de production, fonctionnement bidirectionnel).

# **Chapitre I: Généralités sur les Micro-Réseaux électriques**

---

## **I.7.Conclusion :**

Au cours de ce chapitre, nous avons brièvement décrit les micro-réseaux tout en donnant des définitions, principe de fonctionnement, types et différentes parties qui le constituent dont la production, stockage et gestion intelligent.

Nous avons cité plusieurs exemples pour chaque type de micro-réseau, types d'énergie renouvelable et types de stockage existant jusque à l'heure actuelle.

En fin, on a terminé avec les types de technologies de communication qui caractérisent les systèmes de gestion intelligente muni d'exemple chaque un à fin d'avoir un aperçu.

## **Chapitre II: Alimentation d'un Micro- Réseau Electrique**

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

---

### II.1.Introduction:

Un micro-réseau DC est un micro-réseau alimenté en courant continu provenant des systèmes de conversion d'énergies renouvelables. Dans le cas de notre étude, l'énergie électrique provient des panneaux photovoltaïques et les piles à combustibles.

Dans ce chapitre, nous allons en premier lieu donner un aperçu sur l'historique de l'évolution de l'énergie photovoltaïque, définition et fonctionnement en citant la caractéristique de transformation énergétique ainsi que les types de panneaux photovoltaïques.

On va voir les configurations possibles à réaliser avec les panneaux photovoltaïques (association de panneaux photovoltaïques), ainsi les différentes caractéristiques existantes. On va se référer à des figures pour mieux comprendre.

Ensuite, on va parler sur les piles à combustibles, donner l'historique des piles à combustibles et son évolution dans l'ordre chronologique, définition et fonctionnement en citant la caractéristique de transformation énergétique.

On va voir l'exemple d'une pile à combustible de type PEM (Pile à membrane échangeuse de protons), on donnera sa définition ainsi que ces éléments constitutifs avec le rôle de chacun. On va voir aussi les éléments auxiliaires nécessaires pour son fonctionnement sans oublier la géométrie des canaux de distribution de gaz qui sont l'élément important dans la pile à combustible.

Enfin, on donnera les différents domaines d'applications des piles à combustibles. On se référera à des images côté pratique sans oublier de citer les pays qui ont financé pour plus de développement.



## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

### II.2. Description des systèmes de production d'énergie électrique utilisés dans le micro-réseau étudié :

Dans notre Micro-Réseau, les systèmes de production d'énergie sont les sources de production à courant continu basée sur l'énergie renouvelable dont les piles à combustibles et les panneaux Photovoltaïques. Ces deux types de sources produisent l'énergie électrique par transformation directe de l'énergie primaire.

Il existe principalement deux sources d'énergie à courant continu :

#### II.2.1. Photovoltaïque :

##### II.2.1.1. Historique :

L'histoire du Photovoltaïque remonte à presque deux siècles. En 1839, Edmond Becquerel découvre l'effet photoélectrique, le principe physique à la base de la production d'énergie solaire photovoltaïque.

En 1953, le physicien Gerald Pearson et le chimiste Calvin Fuller, des laboratoires Bell, arrivent à réaliser la première cellule solaire à base de silicium.

Les panneaux photovoltaïques trouvent leur première application dans le cadre de la course à l'espace. L'armée américaine veut les utiliser dans le cadre d'un projet secret : les satellites [25].

##### II.2.1.2. Définition :

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Les cellules photovoltaïques ou composants optoélectroniques sont les éléments de base d'un générateur photovoltaïque. Cette classe de matériaux a la faculté de transformer la lumière "solaire" en énergie électrique.

Une cellule photovoltaïque est conçue à partir d'une jonction  $PN$  c'est-à-dire elle est composée de deux couches : une couche  $P$  et une couche  $N$ . la figure II.1 illustre le Principe de la conversion Photovoltaïque.

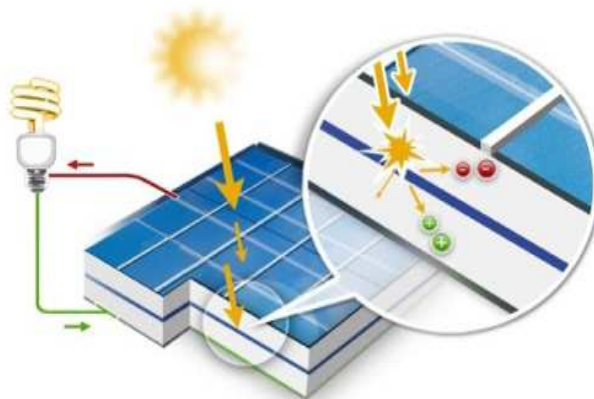


Figure II.1: Principe de la conversion Photovoltaïque [26].

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

Ce phénomène est connu sous le nom d'effet photovoltaïque leur coût constituent un problème de taille, qui freine relativement le déploiement de la filière solaire en l'absence des subventions publiques.

### II.2.1.3.Principe de fonctionnement :

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur trois mécanismes qui sont suivants :

- ❖ Absorption des photons (dont d'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- ❖ Conversion de l'énergie du photon énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron /trou dans la matériau semi-conducteurs.
- ❖ Collecte des particules générées dans le dispositif [27].

La figure II.2 illustre le principe de fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque :

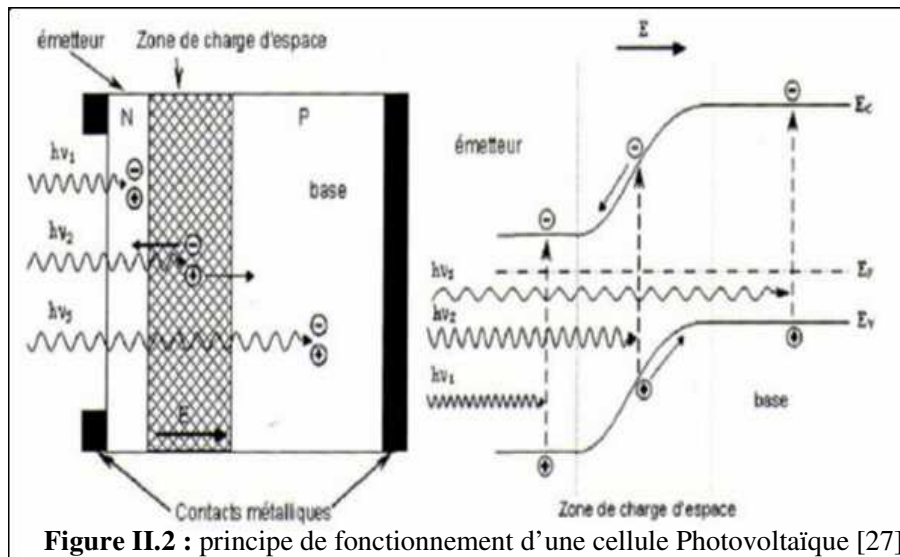


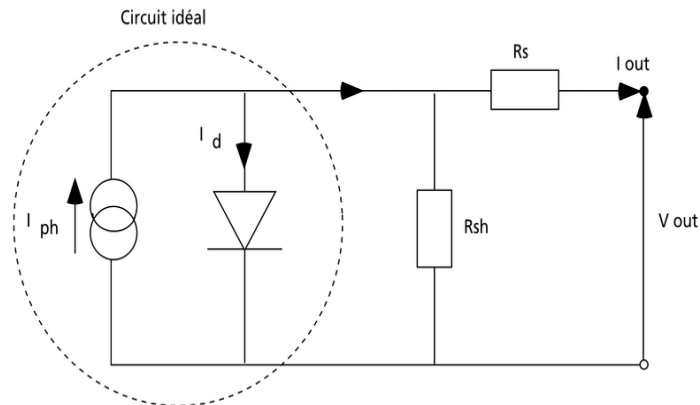
Figure II.2 : principe de fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque [27].

- Les photons incidents créent des porteurs dans la zone Net P et dans la zone de charge d'espace.

#### ❖ Circuit électrique équivalent d'une cellule Photovoltaïque :

Une cellule Photovoltaïque est représentée par un générateur de courant en parallèle avec une diode et une résistance shunt, le tout en parallèle avec une résistance en série avec la charge de la sortie. Le circuit idéal est représenter par le générateur de courant en parallèle avec une diode, voir la figure II.3 :

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique



**Figure II.3 :** Circuit électrique équivalent d'une cellule Photovoltaïque [28].

### II.2.1.4. Types de cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), germanium (Ge), sélénium (Se), sulfure de cadmium (CdS), cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs).

Le Silicium plus utilisé dans la fabrication des cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature On le trouve dans la nature sous forme de pierre chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule  $SiO_2$ . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès) [29].

✓ **Cellule en silicium amorphe:**

Elle procède un rendement de 6 à 10%.

✓ **Cellule en silicium monocristallin :**

Elle procède un rendement de 13 à 17%.

✓ **Cellule en silicium polycristallin :**

Elle procède un rendement de 11 à 15%.

✓ **Cellule Tandem :**

Elle procède un rendement de 12 a 18 %.

✓ **Cellule en matériaux organiques :**

Elle procède un rendement de 3.6%.

### II.2.1.5. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :

La variation du courant «  $I$  » en fonction de la tension «  $V$  » à l'obscurité et en particulier sous éclairage, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire [27], la figure II.4 montre deux exemples de caractéristiques  $I-V$  de cellule solaire en absence et présence d'éclairage:

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

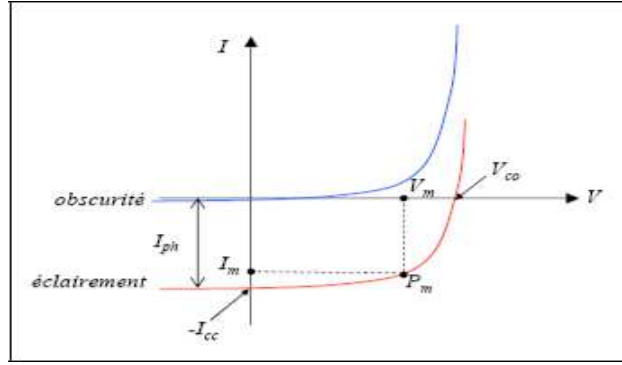


Figure II.4 : caractéristiques  $I-V$  de cellule solaire en absence et présence d'éclairement [27].

L'expérience montre qu'à l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil  $V_s$  [33]. Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, caractéristique  $I-V$  peut être représenté par la relation suivant :

$$I_{obs} = I_s \left[ e^{\frac{V}{nV_{th}}} - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

Sachant que :

$I_s$  : le courant de saturation en Ampère (A).

$n$  : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

$V_{th}$ : Le potentiel thermique en Volt (V); il est donné par la relation suivante:

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$K$  : la constante de Boltzmann ( $1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ).

$T$  : la température absolue en Kelvin (K).

$q$  : la charge absolue d'un électron en coulomb ( $1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

En présence de lumière, un terme  $I_{ph}$ , tenant compte du photo-courant généré s'ajoute, le circuit électrique équivalent obtenu d'une cellule photovoltaïque idéale On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{V}{nV_{th}}} - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres doivent être pris en considération dont les effets résistifs et les fuites vers les bords, on obtient l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{V}{nV_{th}}} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

- ❖  $I_{ph}$  correspondant au courant photogène.
- ❖ La diode (D) représente la jonction P-N.
- ❖  $R_s$  modélise les pertes résistives au sein de la photopile.

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

- ❖  $R_p$  (résistance shunt  $R_{sh}$ ) correspond à une résistance de fuite entre les deux zones  $N$  et  $P$  de la jonction. Cette résistance devra être importante le maximum possible [27].

La figure II.5 montre les caractéristiques courant-tension  $I_{pv} = f(V_{pv})$  et puissance-tension  $P_p = f(V_{pv})$  d'une cellule photovoltaïque pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés.

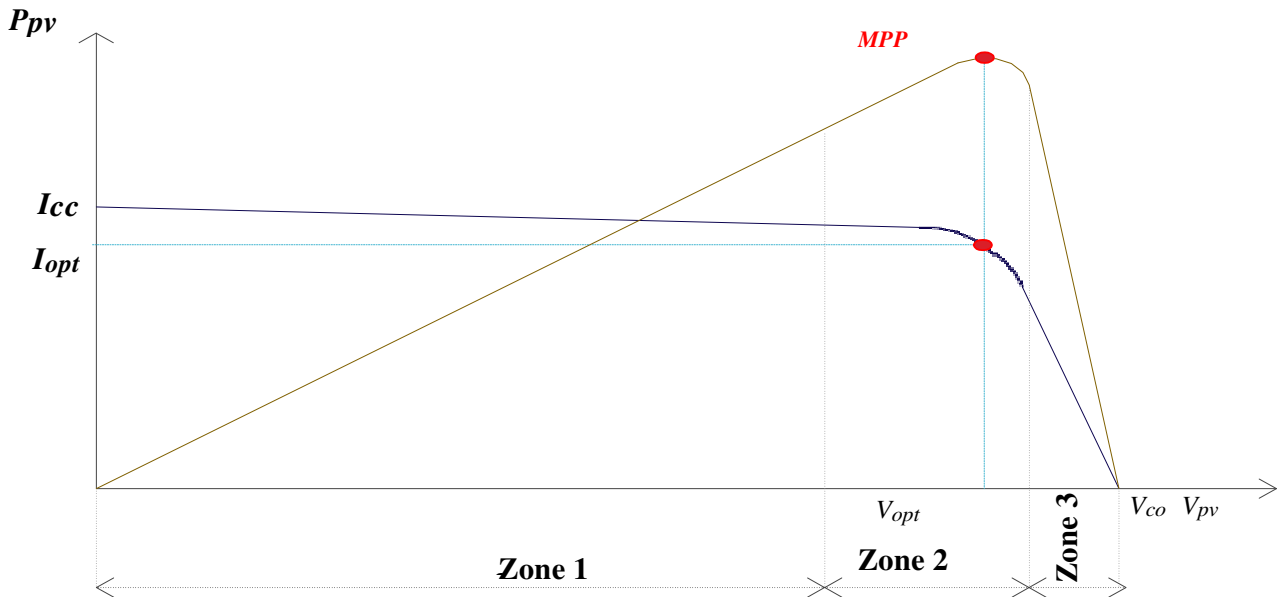


Figure II.5 : Caractéristiques courant et puissance en fonction de la tension [35].

- ✓ **Zone 1 :** Elle est assimilable à un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'irradiation. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.
- ✓ **Zone 2 :** Elle correspond au coude de cette caractéristique, le fonctionnement du générateur dans cette zone donne des puissances élevées à valeurs de courant et tension modérées. Un point optimal de puissance "MPP" (maximum power point) peut être identifié au point  $(I_{opt}, V_{opt})$ . Par conséquent, ce point de fonctionnement permet d'exploiter au mieux le gisement solaire.
- ✓ **Zone 3 :** Elle est assimilable à un générateur de tension  $V_{co}$ , le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées [35].

**MPP** est le Point de fonctionnement à Puissance Maximum.

- **Caractéristiques courant-tension et puissance-tension :**  
Ces caractéristiques sont obtenues expérimentalement par des recherches élaborées par des chercheurs spécialisés dans le domaine de l'énergie renouvelables.

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

Deux cas sont élaborer en se basent sur l'éclairément et la température :

- ❖ Cas d'éclairément à température fixe.
- ❖ Cas de température à éclairément fixe.

D'après les figures précédentes, il est évidant qu'une augmentation de l'éclairément et une baisse de la température favorise l'exploitation des champs photovoltaïques.

Ses deux conditions sont rarement vérifier simultanément dans l'année se qui fait que le rendement des panneaux photovoltaïques est moins élever du fait que la nature de la lumière et de la température sont de nature intermittentes, cella de même pour le Sahara.

Les conditions météorologiques jouent un rôle très important concernant le rendement des stations photovoltaïques.

- **Le rendement d'une cellule photovoltaïque :**

C'est le rapport entre l'énergie absorbé par la cellule et l'énergie produite, nous savant tous qu'aucun système produit plus que ce qu'on lui donne come source primaire, cela est du aux pertes d'énergie sous tout ces formes (chaleur, conduction...etc).

On a: 
$$\eta = \frac{E_{fournie}}{E_{absorber}} \quad (II.5)$$

Sachant que : 
$$E = P \Delta t \quad (II.6)$$

Donc : 
$$\eta = \frac{P_{fournie}}{P_{absorber}} \quad (II.7)$$

- **Le facteur de forme d'une cellule photovoltaïque :**

Le **facteur de forme** (FF) est le rapport des aires des deux rectangles montré dans la figure II.6. Il représente une mesure de la qualité de l'allure de la caractéristique I-V.

Où P, est la puissance lumineuse incidente (W/cm).

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_m V_m}{I_c V_{co}} \quad (II.8)$$

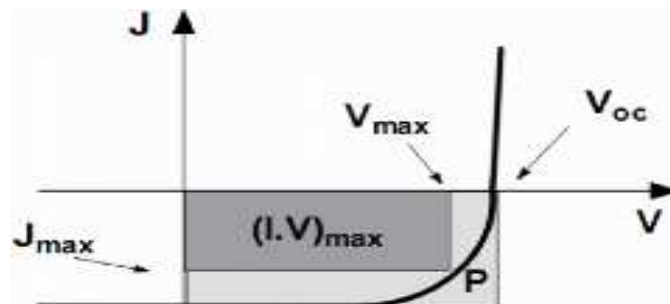


Figure II.6 : Facteur de forme d'une cellule photovoltaïque [40].

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

### II.2.1.6. Association de panneaux Photovoltaïques:

Afin de produire la puissance nécessaire dont le consommateur a besoin, l'association de plusieurs panneaux est nécessaire. Il existe deux types :

#### a. Association parallèle :

En montant en parallèle plusieurs panneaux, le courant globale obtenue est la somme des coutants délivrées par chaque panneau, cela pour une valeur fixe de la tension. Voir la figure II.8:

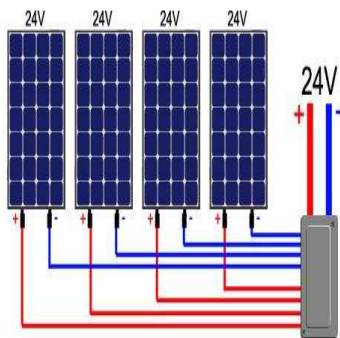


Figure II.8: Schéma du principe de branchement en parallèle de panneaux Photovoltaïques [41].

#### b. Association série :

En montant en séries plusieurs panneaux, la tension globale obtenue est la somme des tensions délivrées par chaque panneau, cela pour une valeur fixe du courant. Voir la figure II.7:

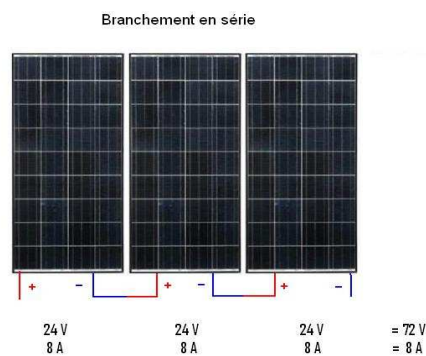


Figure II.7: Schéma du principe de branchement en série de panneaux Photovoltaïques [42].

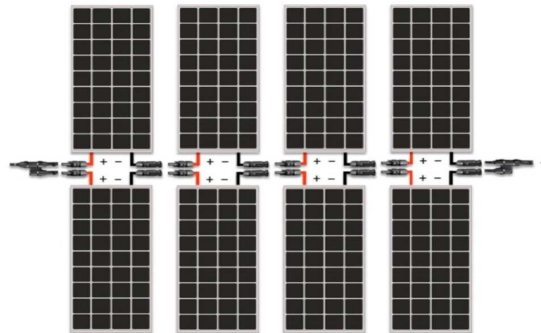
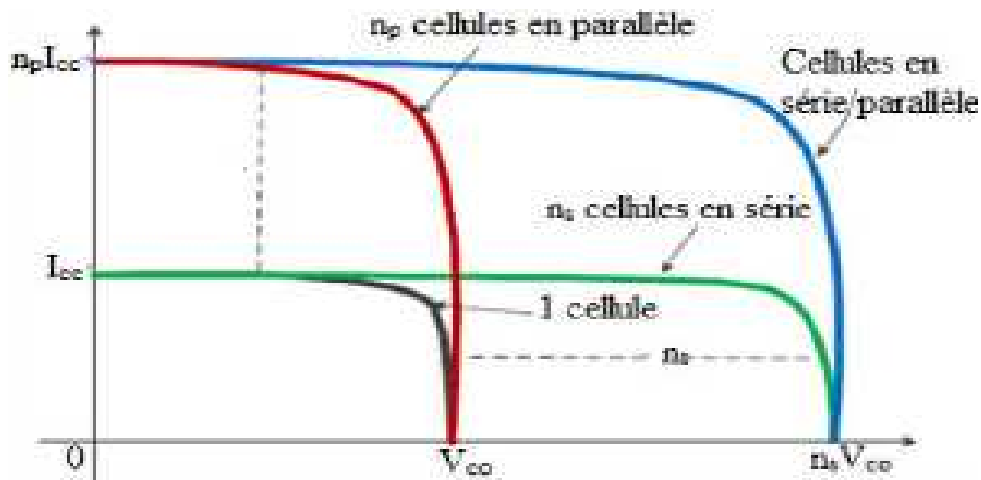


Figure II.9: Schéma du principe de branchement en série- parallèle de panneaux Photovoltaïques [43].

- Caractéristique obtenue à partir de l'association série-parallèle :

Les caractéristiques sont illustrées par la figure II.10 :

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique



**Figure II.10:** Caractéristique de l'association des panneaux Photovoltaïques [44].

- Pour l'association en série on a :

$$I_{cc_{total}} = I_{cc} \quad (\text{II.9})$$

$$V_{co_{total}} = n_s V_{co} \quad (\text{II.10})$$

Donc :  $P_{total} = I_{cc} \cdot n_s V_{co} \quad (\text{II.11})$

- Pour l'association en parallèle on a :

$$I_{cc_{total}} = n_p I_{cc} \quad (\text{II.12})$$

$$V_{co_{total}} = V_{co} \quad (\text{II.13})$$

Donc :  $P_{total} = V_{co} \cdot n_p I_{cc} \quad (\text{II.14})$

- Pour l'association en série-parallèle on a :

$$I_{cc_{total}} = n_p I_{cc} \quad (\text{II.15})$$

$$V_{co_{total}} = n_s V_{co} \quad (\text{II.16})$$

Donc :  $P_{total} = n_p I_{cc} \cdot V_{co_{total}} = n_p n_s V_{co} I_{cc} \quad (\text{II.17})$

- Plus le nombre de cellules monté en série-parallèle augmente plus, le courant total augment ainsi que la tension totale, ce qui fait que la puissance totale devient importante. C'est le but recherché.



## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

### II.2.2. Piles à combustibles :

#### II.2.2.1. Historique :

L'histoire de la Pile A Combustible remonte à plus de deux siècles. En 1806, Sir Humphry Davy réalisait l'électrolyse de l'eau distillée et obtenait de l'hydrogène et de l'oxygène en consommant de l'électricité.

Dans les années 1980, la technologie de la pile a commencé à être testée par les services publics et les constructeurs automobiles. Des avancées techniques ont été faites avec le développement du premier véhicule muni d'une pile à combustible de PEM en 1993 par la société canadienne Ballard [Can08] [45].

#### II.2.2.2. Définition:

La pile à combustible est un système de production d'énergie électrique à base de réaction électrochimique. C'est un système silencieux du à l'absence d'éléments mécaniques tel que : turbines, engrenages, roulements,...etc.

Elle est conçue à partir de plusieurs éléments chimiques dans les combustibles (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et le carburant est l'oxygène de l'air. C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste de radio). La figure II.11 illustre le principe d'une pile à combustible :

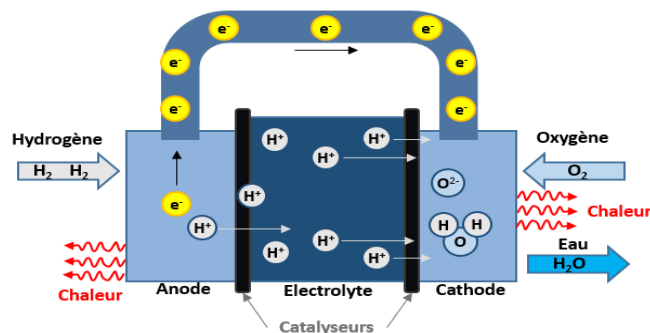


Figure II.11 : Principe d'une pile à combustible [46].

#### II.2.2.3. Fonctionnement :

Le principe repose sur la séparation de la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène de celle de réduction de l'oxygène. Pour cela, la cellule de base d'une pile à combustible est constituée de deux électrodes (anode, cathode) séparées par un électrolyte.

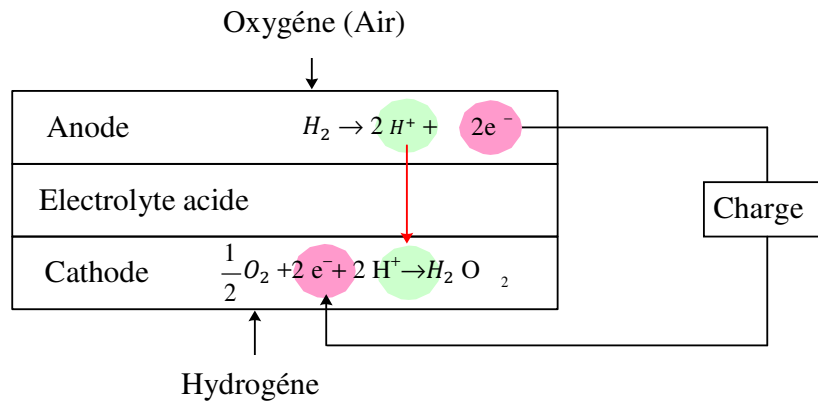
La réaction chimique se traduit par la relation suivante :



Selon le type d'électrolyte acide ou basique (alcalin), la réaction chimique conduisant à la production d'électricité et de chaleur diffère [47].

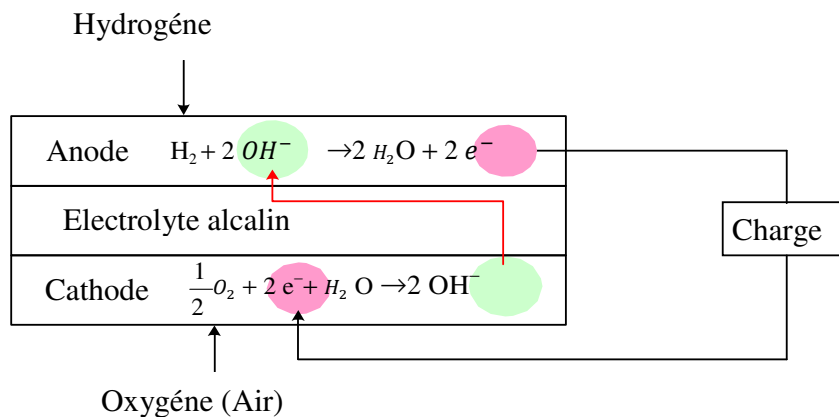
Dans un électrolyte acide, ce sont les ions positifs (protons) qui se déplacent de l'anode à la cathode. L'eau est produite à la cathode. Voir la figure II.12:

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique



**Figure II.12:** Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide [47].

Par contre, dans un électrolyte basique (alcalin), ce sont les ions négatifs qui se déplacent de la cathode à l'anode. L'eau est produite à l'anode, mais de l'eau est aussi nécessaire à la cathode pour créer les ions. Voir la figure II.13:



**Figure II.13:** Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique [47].

### II.2.2.4. Types de piles à combustibles :

Il existe plusieurs types de piles à combustible, la différence réside dans le type d'électrolyte utilisé. Mais aussi la température de fonctionnement, on parle ici de piles à combustible basse température ou bien haute température. Du côté pratique, plus la température de fonctionnement est basse, plus le système est simple à utiliser.

Mais par contre plus les catalyseurs sont onéreux et plus le carburant doit être riche en hydrogène.

Les principaux types de pile à combustible sont les suivants :

- ✓ Pile à solution alcaline AFC (en Anglais Alkaline fuel Cell) ;
- ✓ Pile à polymère conducteur de protons PEMFC (en Anglais Proton Exchange Membrane Fuel- Cell).
- ✓ Pile à polymère conducteur de protons DMFC (en Anglais Direct Methanol Fuel Cell).
- ✓ Pile à acide phosphorique PAFC (en Anglais Phosphoric Acid Fuel Cell).

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

- ✓ Pile à carbonate fondu MCFC (en Anglais Molten carbonate Fuel Cell).
- ✓ Pile à électrolyte solide (céramique) SOFC (en Anglais Solid Oxid Fuel Cell).

Le tableau II.1 illustre les principaux types de combustibles :

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Polymère conducteur de protons	solution alcaline	Acide phosphorique	carbonate fondu	électrolyte solide (céramique)	Polymère conducteur de protons
Catalyseur	platine	platine	platine	nickel et l'oxyde de nickel	Cerm et nickel-zircone	platine
Charge mobile	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>
Température de fonctionnement en (°C)	40 - 90	65 - 220	205	650	600 - 1000	50 - 130
Rendement électrique pile en (%)	35 - 40	60 - 70	50	65	45 - 65	20 - 30
Champs d'applications	automobile, cogénération	applications spatiales	cogénération	cogénération	cogénération	applications mobiles

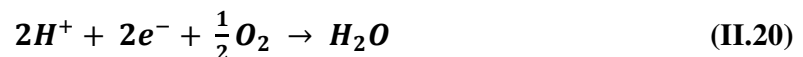
**Tableau II.1 :** Différents types de piles à combustible [47].

### II.2.2.5. Piles à combustible de type PEM (Pile à membrane échangeuse de protons) :

La pile à membrane échangeuse de protons contient comme électrolyte acide, une membrane. A l'anode, l'hydrogène se décompose en électrons et en protons. La membrane, qui est imperméable aux gaz, ne laisse passer que les protons.

Les électrons sont conduits de l'anode à la cathode par un circuit extérieur à travers une charge électrique. A la cathode, l'oxygène se combine avec les protons et les électrons pour produire de l'eau [47].

Le principe d'une PEM se traduit par les réactions suivantes :



La figure II.14 illustre le principe d'une PEM :

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

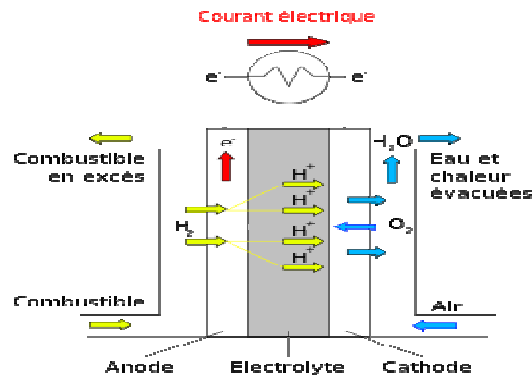


Figure II.14: Principe d'une piles à combustible de type PEM [48].

### II.2.2.6. Structure interne du stack PEM :

L'élément de base d'une cellule élémentaire de pile PEM est constitué d'un empilement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte solide. De chaque coté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires [47]. Voir la Figure II.15 :

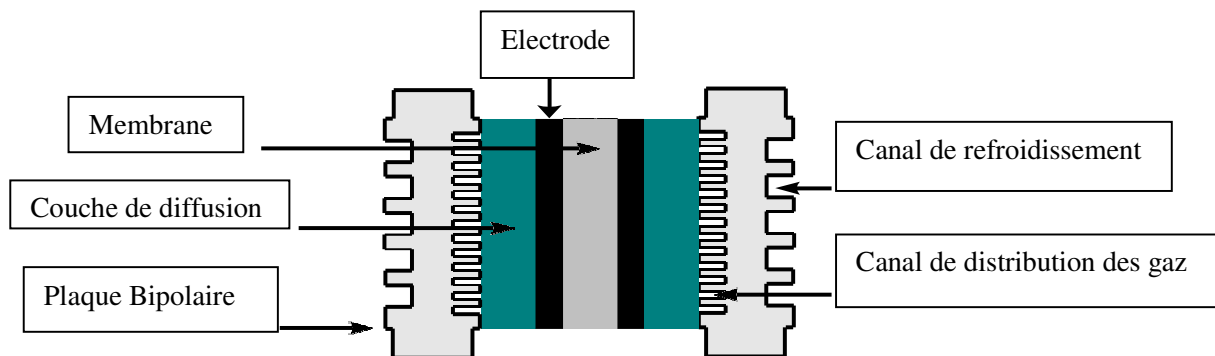


Figure II.15 : Élément de base d'une cellule élémentaire de pile PEM [47].

#### a. Plaques bipolaires :

Elle permet d'assurer l'arrivée des gaz à la surface de la couche de diffusion. Elles sont à base de graphite [Lar00, Han04] et contiennent des canaux qui permettent le passage des gaz le long de la surface. Sur le dos de chaque plaque.

#### b. Couches de diffusion :

Elles assurent une bonne distribution des gaz sur toute la surface de réaction, qui est la surface active de l'électrode.

Elles doivent avoir une bonne résistance mécanique à la température et à la présence d'eau.

#### c. Membrane :

Membrane semi-perméable fabriquée à partir d'ionomères permettant la conduction protonique tout en étant imperméable aux gaz tels que le dioxygène ou le dihydrogène les protons passent à travers alors que les gaz sont stoppés.

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

---

### d. Electrodes :

Les électrodes sont à base d'un matériau carboné sur lequel sont déposés des grains de platine jouant le rôle de catalyseur. Elles sont superposées sur la membrane.

### e. refroidissement :

C'est un élément important dans tout milieu où il y a présence de réaction électrochimique, il permet de faire baisser la température de tous les éléments constitutifs de la PEM, plus exactement le canal de distribution du gaz.

### f. Canal de distribution des gaz :

Il permet la répartition du gaz à travers les deux surfaces de la PEM afin d'avoir leur rôle est d'assurer une répartition homogène [47].

#### II.2.2.7. Les éléments auxiliaires d'une pile à combustible PEM :

Sont les différents appareils qui entourent le stack, comme citer ci-dessous :

- Un compresseur ou une turbine qui alimente le circuit cathodique en air.
- Un système d'alimentation en hydrogène qui selon que l'hydrogène est fabriqué sur place ou non, comprend dans le premier cas un système de reformage et dans le deuxième cas des réservoirs sous pression et un ou des détendeurs assurant le réglage de la pression de l'hydrogène à celle de fonctionnement de la pile.
- Un ou deux humidificateurs selon qu'un ou deux des gaz d'alimentation sont humidifiés afin de permettre un bon fonctionnement des membranes.
- Différents accessoires destinés à la distribution des gaz (électrovannes, tuyauteries...).
- Un circuit de refroidissement qui permet la régulation de la température de fonctionnement de la pile (circuit de refroidissement et de chauffage pour le démarrage, capteurs thermiques...).
- Un convertisseur statique qui permet la gestion de l'énergie délivrée par la PAC.
- un élément de contrôle assurant la gestion des flux de gaz en fonction du courant demandé et la sécurité du système [47].

#### II.2.2.8. Géométrie des Canaux de distribution des gaz :

Différentes géométries de canaux de circulation peuvent être définies dans les suivants :

### a. Canal en serpentin :

La structure en serpentin est largement utilisée car elle assure un chemin préférentiel à travers le système. Aucun canal n'est fermé ce qui rend plus difficile la formation d'un bouchon dans le fluide.

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

---

Cependant, cette structure est responsable de chutes de pression et est plus difficile à fabriquer. Voir la figure II.16:

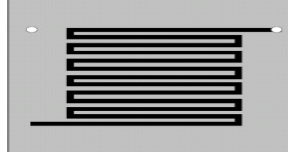


Figure II.16 : Canal de distribution des gaz en serpentins [49].

### b. Canal en serpentins parallèles :

La structure serpentine parallèle, qui force les gaz à travers une couche de diffusion, peut être avantageuse pour les gaz purs, mais elle n'est généralement pas la structure préférée à cause des blocages dus à la formation des gouttelettes d'eau et à la perte de charge importante. La formation des bouchons dans les canaux, qui est due à l'évacuation inefficace de l'eau à cause de la distribution inégale des flux entre les canaux parallèles, présente l'inconvénient majeur de cette configuration. Voir la figure II.17:

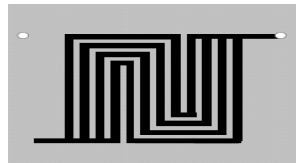


Figure II.17 : Canal de distribution des gaz en serpentins parallèles [49].

### c. Canal mixte :

Cette configuration permet aux gaz de se mélanger au niveau des coudes afin de minimiser l'effet du blocage dans le canal. Ceci n'élimine pas la chance du bouchage du canal, mais limite son effet seulement à une partie du canal. Voir la figure II.18 :

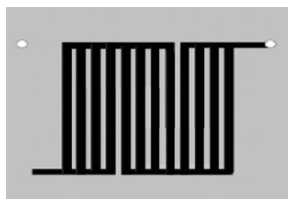


Figure II.18 : Canal de distribution des gaz mixte en Serpentin Parallèle [49].

### d. Plot en carré ou grille :

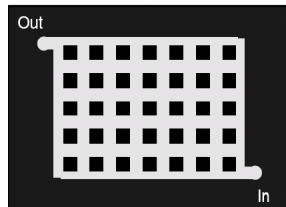
Cette structure, constituée de plots régulièrement disposés, n'est pas optimale pour une distribution égale des gaz qui peuvent circuler à travers la pile par n'importe quel chemin possible.

Le résultat est que certains chemins peuvent être bloqués (formation d'un bouchon de liquide) et ainsi la distribution de courant dans l'électrode n'est pas homogène.

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

---

L'avantage de cette géométrie est que la chute de pression est minimale durant le trajet. Voir la figure II.19:



**Figure II.19:** Canal de distribution des gaz Plot en carré ou grille [49].

### e. Structure Parallèle:

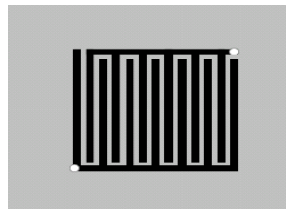
Cette structure utilise également des canaux fermés ce qui peut provoquer des bouchons par formation de gouttelettes d'eau. Cette structure souffre aussi de forte chute de pression. Voir la figure II.20:



**Figure II.20 :** Canal de distribution des gaz Structure Parallèle [49].

### f. Canaux discontinus :

Cette géométrie est une solution du problème de la diffusion décroissante du gaz dans la couche de diffusion : Comme les canaux sont discontinus, le gaz est obligé, pour passer des canaux d'admission aux canaux de sortie, de traverser la couche de diffusion poreuse. Le processus d'évacuation d'eau liquide et du transport des réactifs à travers la couche de diffusion est plus efficace par rapport aux autres configurations à cause de la convection forcée dans la GDL. Cette configuration a une bonne performance, mais la perte de charge est également élevée. Voir la figure II.21:



**Figure II.21:** Canaux de distribution des gaz discontinus [49].

### g. Canal en spirale :

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

La géométrie du canal en spirale est une alternative intéressante, c'est la combinaison du transport efficace de l'eau avec l'avantage d'avoir des canaux contenant des gaz cathodique frais et épuisé cote à cote. Voir la figure II.22:

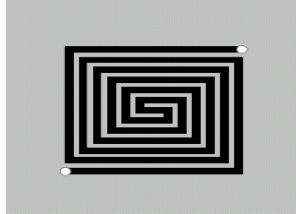


Figure II.22 : Canal de distribution des gaz en spirale [49].

### II.2.2.9. Caractéristique d'une pile à combustible :

L'utilisation d'une pile à combustible dépend de la valeur des grandeurs en puissance, tension et courant destinées à la charge. On parle ici des courbes de tension et de puissance en fonction du courant ; c'est-à-dire :

$$U = f(I) \text{ et } P = f(I)$$

La figure II.23 illustre la caractéristique d'une pile à combustible :

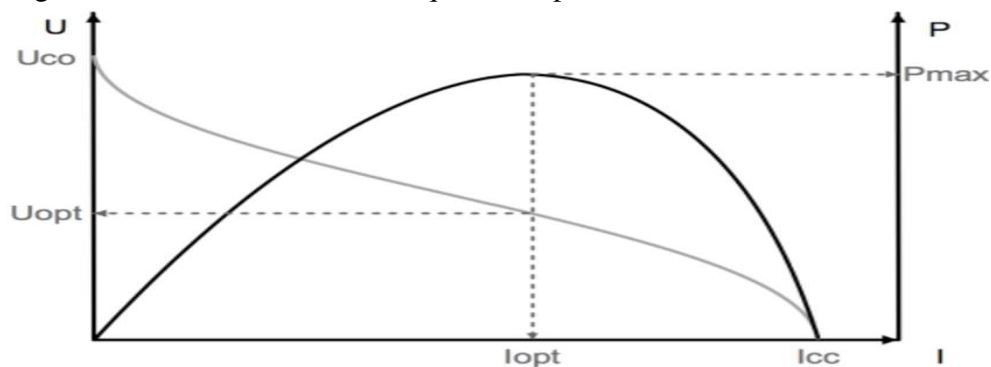


Figure II.23: Caractéristique d'une pile à combustible [50].

### II.2.2.10. Les différentes équations caractérisant les piles à combustibles :

Une pile à combustible est caractérisée par la transformation directe de l'énergie chimique d'une réaction en énergie électrique.

#### a. Le travail électrique :

Le travail électrique  $W_{\text{elec}}$  fourni par la pile correspond au déplacement des charges électriques (ions et électrons) entre les deux niveaux de potentiel auxquels se situent les électrodes. Il est égal à la variation d'enthalpie libre  $\Delta G$  au cours de la réaction chimique [47].

$$W_{\text{elec}} = -\Delta G \quad (\text{II.21})$$

Si l'anode est au potentiel  $E_a$  et la cathode au potentiel  $E_c$  et si la réaction produit  $n$  électrons par mole de combustible oxyde, alors on obtient :

$$W_{\text{elec}} = -nF (E_a - E_c) \quad (\text{II.22})$$

Avec :  $F$  est la constante de Faraday ( $96,48 \times 10^{-7}$ ).



## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

$$\text{Donc : } W_{MAX} = -\Delta G - nF(E_a - E_c)_{MAX} \quad (\text{II.23})$$

Avec :  $W_{MAX}$  est le travail maximal théorique.

Ceci signifie que la tension maximale de la pile en circuit ouvert devient:

$$(E_a - E_c)_{MAX} = \frac{\Delta G}{(E_a - E_c)_{MAX}} \quad (\text{II.24})$$

### b. Le rendement :

Le rendement électrique d'une pile à combustible  $\eta_{\text{elec}}$  est défini comme étant le rapport entre l'énergie électrique produite  $W_{\text{elec}}$  à l'énergie chimique apportée par les réactifs, c'est à dire l'énergie thermique qui serait libérée par la réaction  $\Delta H$  [47]:

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{W_{\text{elec}}}{\Delta H} \quad (\text{II.25})$$

Le rendement énergétique maximal est le rapport entre le travail maximal théorique  $W_{\text{max}}$  fourni par une pile (c'est-à-dire qui fonctionnerait de manière réversible) et la variation d'enthalpie au cours de la réaction :

$$\eta_{\text{ener}} = -\frac{W_{\text{énerg}}}{\Delta H} \quad (\text{II.26})$$

- Pour une pile à combustible fonctionnant en hydrogène et oxygène, les enthalpies de formation de l'eau à 25°C sont de -285 kJ/mol (d'hydrogène) et -242 kJ/mol (d'oxygène) Selon que l'eau est formée respectivement sous forme liquide ou gazeuse. Le rendement Théorique maximal, à 25°C, est donc de 83% si l'eau formée est liquide et de 95% dans le cas de vapeur d'eau. En pratique, la tension  $U$  de la pile est inférieure à la valeur maximale, à cause de l'irréversibilité des réactions, de la chute ohmique et de la diffusion des réactifs jusqu'aux sites catalytiques. Le rendement électrique réel peut s'écrire en fonction de la tension  $U$  [47]:

$$\eta_{\text{elec}} = -\frac{nFU}{\Delta H} \quad (\text{II.27})$$

### II.2.2.11. Système de commande d'une pile à combustible :

La commande d'un système pile à combustible repose principalement sur la commande des systèmes auxiliaires et de puissances.

La commande systèmes auxiliaires repose sur la commande du flux des gaz puisqu'ils sont la source d'énergie primaire de notre système. Par contre la commande des systèmes de puissance repose sur la commande du Hacheur et de l'onduleur alimentant les charges.

La figure II.24 illustre un exemple d'une pile a combustible alimentant un Hacheur :

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

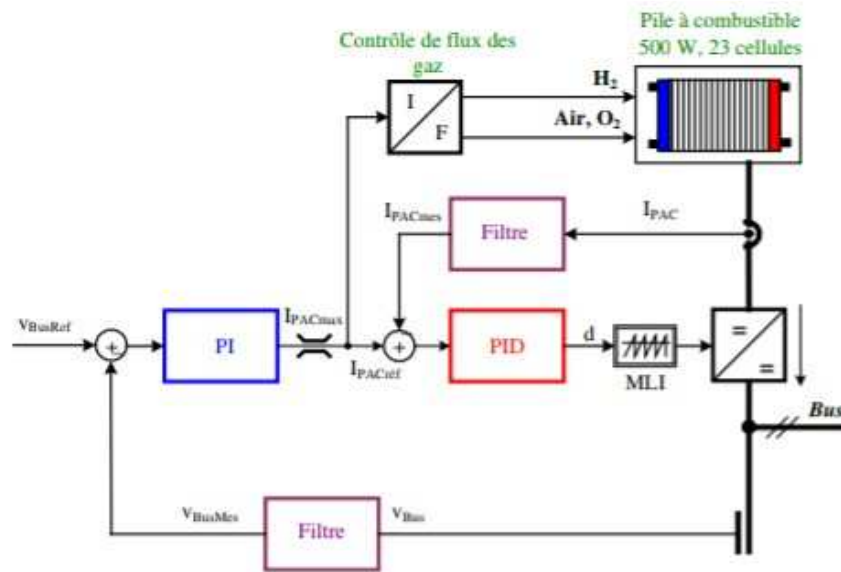


Figure II.24 : Pile a combustible alimentant un Hacheur [47].

Dans l'exemple précédant la pile à combustible alimente une charge à courant continu par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC. La commande utilisée pour ce convertisseur est une commande classique basée sur un régulateur de courant de type PID et un régulateur de tension de type PI [47].

- **Principe de fonctionnement :**

- ✓ Le hacheur alimente la charge avec des niveaux de tension et de courant donné.
- ✓ La tension obtenu a la sortie du Hacheur ( $V_{Bus}$ ) sera filtrée et additionner avec une tension de référence ( $V_{Bus Ref}$ ) et réguler avec un régulateur **PI**.
- ✓ A la sortie du PI on obtient un courant ( $I_{PAC max}$ ) qui servira d'information destinée au contrôle du flux des gaz.
- ✓ Le courant obtenue a la sortie de la PAC ( $I_{PAC}$ ) sera filtré et additionner avec le courant obtenu a la sortie du PI ( $I_{PAC max}$ ) et réguler avec un régulateur PID. Un signal  $d$  sera fusionner avec le signale triangulaire d'une porteuse qui feras l'objet d'information destinée au contrôle du Hacheur.

### II.2.2.12. Domaines d'applications des piles à combustibles :

#### a. Application stationnaires :

Les systèmes de piles à combustible BALLARD produisent 250KW qui vent être distribués sur les lignes électriques.

Actuellement, il y a 9 systèmes en Amérique du Nord, en Europe et au Japon.

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

Plus de 3,5 millions de KW d'électricité ont été produits jusqu'à aujourd'hui [51]. La figure **II.25** nous montre un exemple sur l'application stationnaire d'une pile à combustible :



**Figure II.25:** Application stationnaire [52].

### b. Applications mobiles sur autobus :

De 1993 à 2006, 30 bus fonctionnant grâce à une pile à combustible ont été mis en service dans 10 grande villes d'Europe (programme de transport en commun (Programme européen CUTE) [51]. La figure **II.26** nous montre un exemple sur l'application d'une pile à combustible sur autobus :



**Figure II.26:** Application pour autobus [53].

### c. Application pour Voitures :

Pratiquement tous les constructeurs automobiles possèdent leur prototype de voiture fonctionnant avec une pile à combustible. Des flottes captives voient le jour actuellement au Japon et en Allemagne [51]. La figure **II.27** nous montre un exemple sur l'application d'une pile à combustible pour voiture :

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

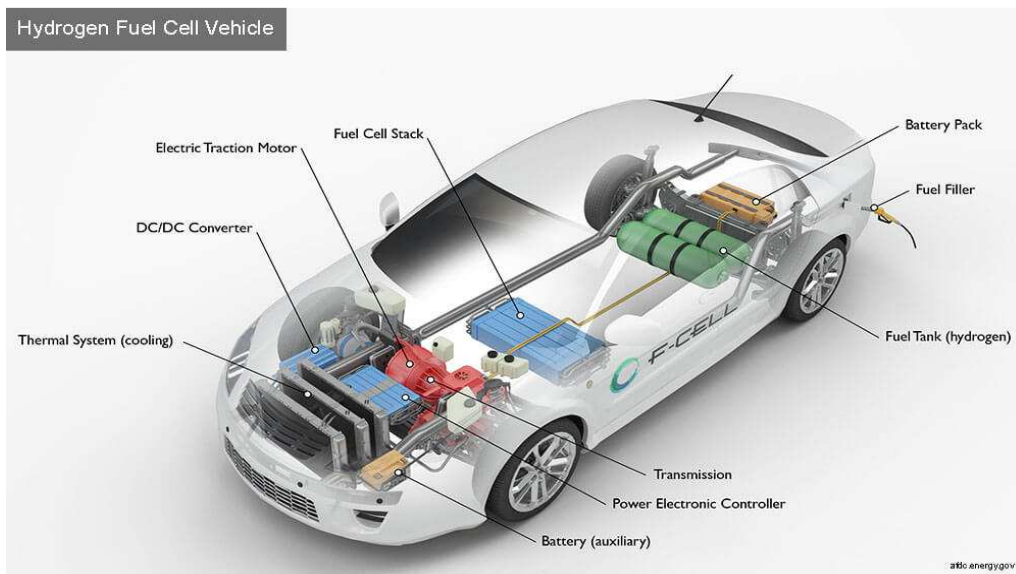


Figure II.27: Application pour voiture [54].

### d. Applications portables :

Elles sont utilisées pour alimenter des appareils électriques ou électroniques comme les caméras et appareils photos, les téléphones portables ou bien des lampes, elles sont aussi fabriquées sous forme de batteries portables. La figure II.28 nous montre un exemple sur l'application portable d'une pile à combustible :



Figure II.28: Application portable d'une pile à combustible [55].

- ❖ On peut obtenir du courant alternatif à partir du courant continu en passant par un onduleur ou bien le contraire en passant par un redresseur. L'inconvénient réside dans les pertes de conduction dans les éléments d'électronique de puissance. Donc il est préférable d'avoir le maximum de récepteur utilisant le même type de courant avec celui de la source primaire afin de réduire au maximum les conversions d'énergie.

## Chapitre II: Alimentation d'un Micro-Réseau électrique

---

### II.3 Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons décrit les deux sources d'énergie électrique à courant continu dont le photovoltaïque et les pile à combustible qui alimentent notre Micro-Réseau en énergie.

D'abord, nous avons parlé sur l'historique des deux systèmes étudiés, on a cité leurs définitions, principe de fonctionnement et les différents types. Ensuite, on a donné les caractéristiques de chaque système, on a donné les différents types de configuration possible concernant l'association des panneaux photovoltaïques, on a aussi donné l'exemple de la PEM qui est la plus utilisée, nous avons défini les éléments internes qui la constituent et donner les différents périphériques auxiliaires nécessaires pour son fonctionnement.

En fin, on a terminé par donner quelques applications de la pile à combustibles du côté pratique en citons les pays qui investissent dans sa recherche pour plus de développement du fait qu'elle est une technologie nouvelle.

# **Chapitre III: Modélisation d'un Micro- Réseau électrique**

## **Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique**

---

### **III.1. Introduction:**

Un micro-réseau DC est constitué d'un ensemble de sous système qui permettant de réaliser les différents convertirons d'énergie destiner pour l'alimentation de ces différentes charges.

Dans ce chapitre, nous allons on premier lieux décrire brièvement les convertisseurs d'électronique de puissance dont les Hacheurs et les Onduleurs qui représentent les éléments essentiels dans l'acheminement de l'énergie produit de la source au récepteurs tout en citons leur définitions, les types ainsi les que caractéristiques de chaque un.

Ensuite, on va citer les différents systèmes de commande utilisés dans la commande des convertisseurs. Donner les différentes équations de commande ainsi les algorithmes da la méthode de MPPT les plus utiliser côté pratique.

En fin, on terminera avec les différentes équations différentielles qui gouvernent les éléments de notre Micro-Réseau allant de la source à la charge.

# Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

## III.2. Les convertisseurs statiques utilisés dans la modélisation du Micro-réseau :

Dans notre Micro-réseau nous utiliseront la conversion DC/DC pour le stockage et l'alimentation des charges DC mais aussi la conversion DC/AC pour l'alimentation des charges AC.

### III.2.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur) :

#### III.2.1.1. Fonctionnement :

Ce convertisseur permet d'adapter la tension au niveau cohérent afin de la stocker et/ou alimenter directement les récepteurs DC, d'une autre manier c'est un variateur de tension. Voir la figure III.1:

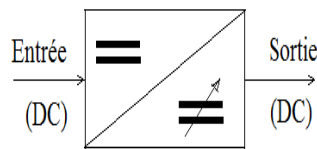


Figure III.1 : Schéma de principe d'un Hacheur.

#### ❖ Élément d'électronique de puissance de base utilisé dans un Hacheur :

Généralement ils sont conçus à partir des IGBT (insulated-gate bipolar transistor) qui veut dire transistor bipolaire à grille isolée ou bien d'autres comme les GTO (Gate Turn Off) qui veut dire Thyristor de désactivation de grille. Dans notre étude on se basera sur l'IGBT. la figure III.2 illustre la structure d'un IGBT :

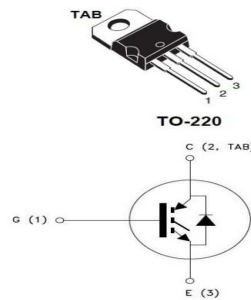


Figure III.2: Transistor IGBT.

#### ❖ Caractéristique statique d'un IGBT : C'est le tracer de la courbe qui nous donne la tension $IA$ (de l'anode) en fonction de la tension $VAK$ (entre l'anode et la cathode). voir la figure III.3 :



# Chapitre III : Modélisation d'un Micro-Réseau électrique

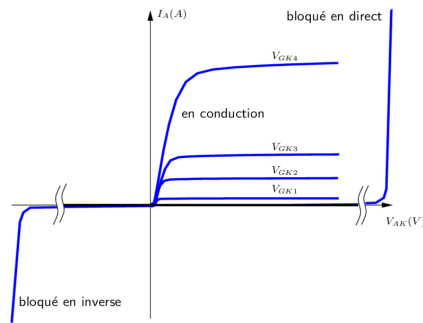


Figure III.3 : Caractéristique statique d'un IGBT.

- ❖ **Cellule de commutation d'un Hacheur** : Ensemble des éléments entourant l'IGBT utilisés dans la conception du Hacheur. Voir la figure III.4:

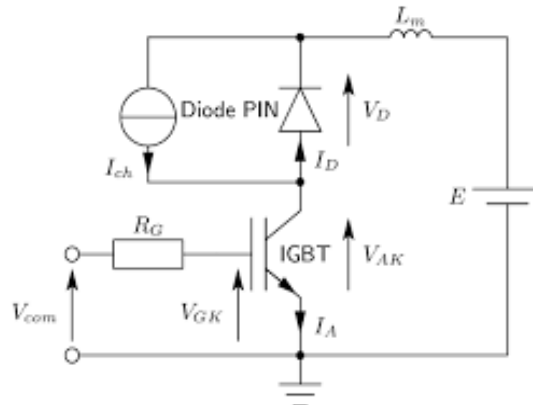


Figure III.4: Cellule de commutation type Hacheur.

Le Hacheur est caractérisé par le rapport cyclique  $\alpha$  sachant que :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T_{of}} \quad (III.1)$$

La tension de sortie est donnée par la relation suivante :

$$U_d = (1 - \alpha)U_s \quad (III.2)$$

	$0 \leq \alpha \leq 1$	(III.3)
Pour	$\alpha = 0$ , on a : $U_d = U_s$	(III.4)
Pour	$\alpha = 1$ , on a : $U_d = 0$	(III.5)

- ❖ **Rendement** : Il est donné par la relation suivante :

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

$$\eta = \frac{P_d}{P_s} \quad (III.6)$$

Avec :  $P_d = U_d \cdot I_d$  et  $P_s = U_s \cdot I_s$  (III.7)

$$\eta = \frac{(U_d \cdot I_d)}{(U_s \cdot I_s)} = \frac{(1-\alpha)U_s \cdot I_d}{(U_s \cdot I_s)} = (1 - \alpha) \frac{I_d}{I_s} \quad (III.8)$$

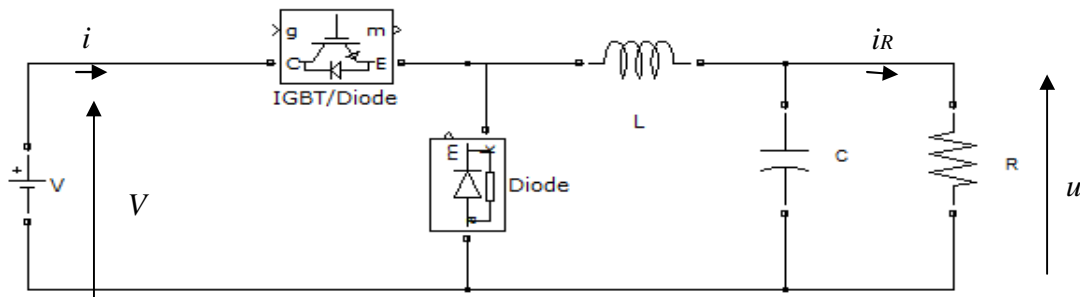
Plus le  $\alpha$  augmente plus le rendement diminue. Souvent des pertes considérables inutiles sont constatées au niveau des convertisseurs.

**III.2.1.2 Types de hacheurs :** Il existe 2 types qui sont les suivants :

**III.2.1.2 .a. Hacheur série ou bien dévolteur (abaisseur de tension) :**

Ce Hacheur permet de faire abaisser la tension afin de l'adapter à celle de la charge tout en agissant sur le rapport cyclique.

On prend l'exemple d'un Hacheur débitant sur une charge résistive R, voir la figure III.5:



**Figure III.5:** Montage d'un Hacheur série.

❖ **Fonctionnement :**

- A  $0 < t \leq \alpha T$  : Q est fermé. Donc un courant passe de la source vers la charge.
- A  $\alpha T < t \leq T$  : Q est ouvert. Donc aucun courant passe de la source vers la charge.

Du fait que dans une charge résistive le courant et la tension sont en phase, alors le courant et la tension sont de même forme.

On a: 
$$u = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V dt \quad (III.9)$$

Alors : 
$$u = \frac{1}{T} \alpha V \quad (III.10)$$

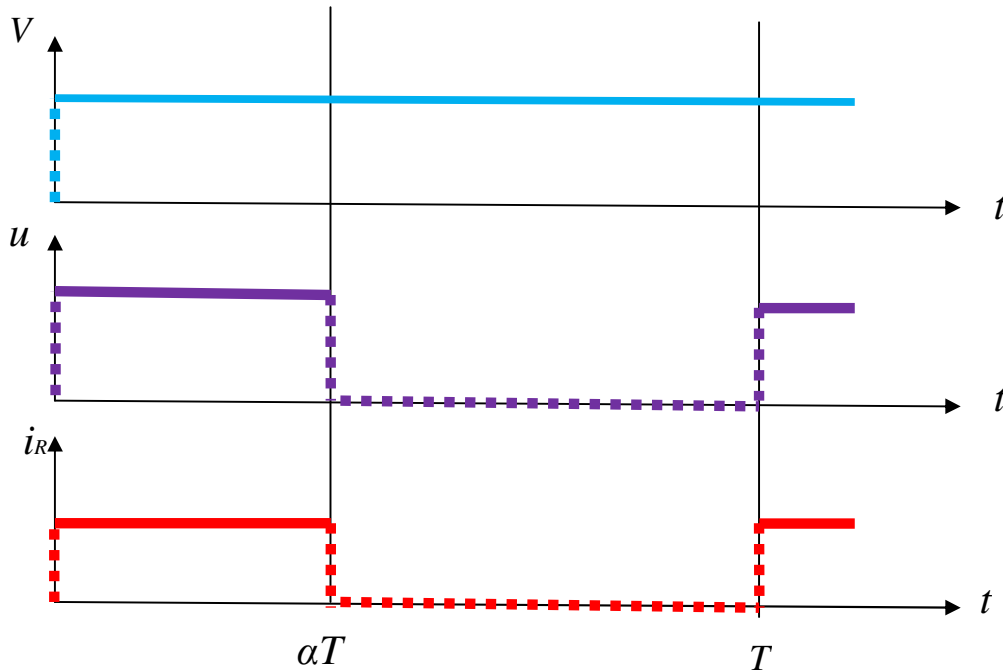
Sachant que: 
$$i_R = \frac{u}{R} \quad (III.11)$$

Donc : 
$$i_R = \alpha \frac{u}{R} \quad (III.12)$$

- D représente la diode et Q représente l'IGBT.

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

La figure III.6 illustre l'allure de la tension de la source et celle de la charge ainsi le courant de la charge pour un montage série :



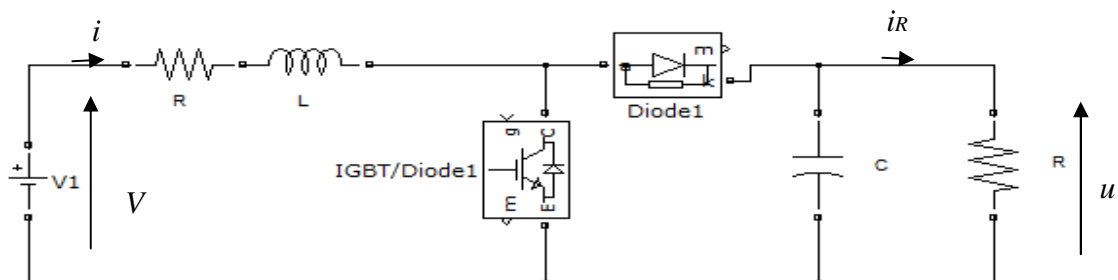
**Figure III.6:** Allure de courant/tension d'un Hacheur série débitant sur charge R.

La tension moyenne de sortie est inférieure à la tension continue d'entrée se qui implique que le courants moyen de sortie est supérieure au courants moyen d'entrée.

### III.2.1.2 .b. Hacheur parallèle ou bien survolteur (élévateur de tension) :

Ce Hacheur permet de faire élever la tension a fin de l'adapter a celle de la charge tout on agissant sur le rapport cyclique.

On prend l'exemple d'un Hacheur débitant sur une charge résistive R, voir la figure III.7 :



**Figure III.7:** Montage d'un Hacheur parallèle.

#### ❖ Fonctionnement :

Le fonctionnement est déterminer selon le type de conduction, dans notre cas en se limite à une conduction discontinue :

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

---

- A  $0 < t \leq \alpha T$  :  $\mathbf{Q}$  est fermé, une énergie électromagnétique est stocker directement dans l'inductance  $L$ , donc  $U_c = 0$ .

$$\text{On a : } V = L \frac{di}{dt}, \text{ alors : } i(t) = \frac{V}{L}t + i(0) \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Pour : } t = 0 \text{ et } i = I_{min}, \text{ on obtient : } i(t) = \frac{V}{L}t + I_{min} \quad (\text{III.14})$$

$$\text{Pour : } t = \alpha T \text{ et } I_{min} = I_{max}, \text{ on obtient : } I_{max} = \frac{V}{L}\alpha T + I_{min} \quad (\text{III.15})$$

- A  $\alpha T < t \leq T$  :  $\mathbf{Q}$  est ouvert (commutation forcé), l'inductance  $L$  ce décharge à travers la diode  $D$ , donc  $U_c > E$ .

La charge est donc isolée de la source, elle reçoit l'énergie de l'inductance  $L$ .

On a : relation entre la tension aux bornes de la charge  $U$  et la tension de la source  $E$  :

$$V = L \frac{di}{dt} + U, \text{ alors : } i(t) = \frac{V-U}{L}t + i(\alpha T) \quad (\text{III.16})$$

$$\text{Donc : } (U - V)(T - \alpha T) = -L(I_{max} - I_{min}) \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Alors: } U = \frac{V}{(1-\alpha)} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{On à: } P_E = P_C \quad (\text{III.19})$$

$$\text{Sachant que : } Vi = Ui_R \quad (\text{III.20})$$

$$\text{Donc : } i_R = \frac{i}{(1-\alpha)} \quad (\text{III.21})$$

La figure **III.8** illustre l'allure de la tension de la source et celle de la charge ainsi le courant de la charge pour un montage parallèle :

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

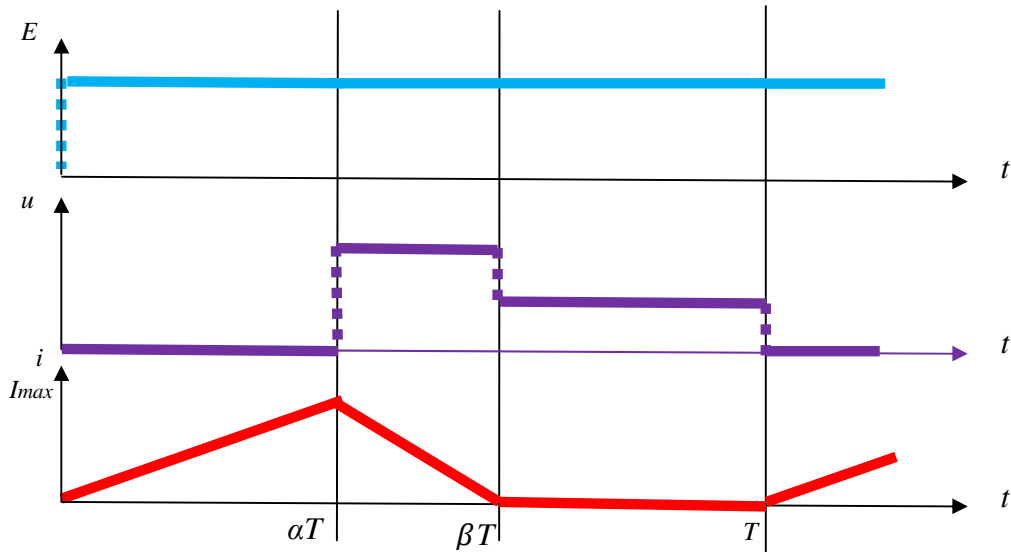


Figure III.8 : Allure de courant/tension d'un Hacheur Parallèle débitant sur charge R.

### III.2.1.2 .c. Hacheur réversible en courant :

Ce Hacheur permet la circulation du courant dans les deux sens c'est-à-dire de la source vers la charge ou bien de la charge vers la source. Il est obtenu à partir de l'association d'un Hacheur survolteur avec un autre dévolteur. Voir la figure III.9:

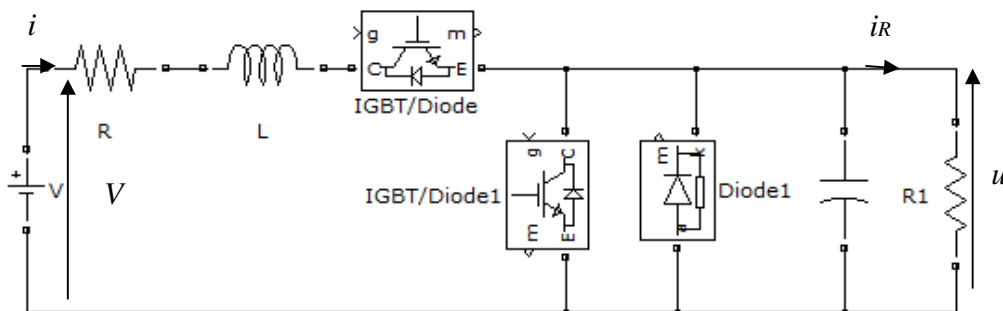


Figure III.9: Montage d'un Hacheur réversible en courant.

#### ❖ Fonctionnement :

Il ya deux phases de fonctionnement :

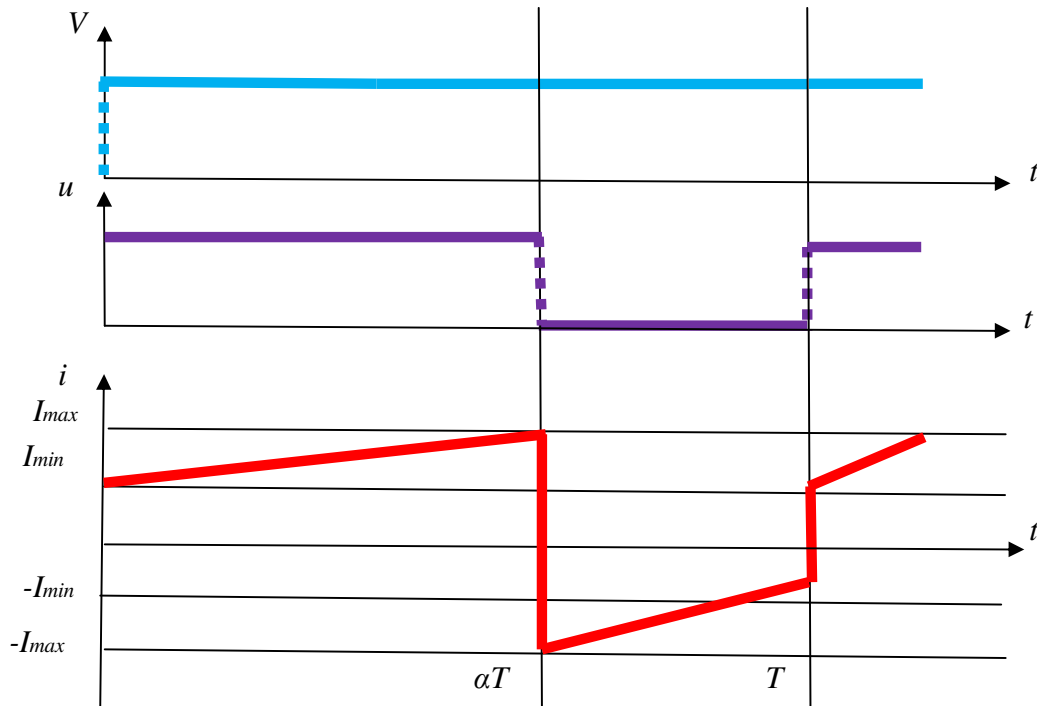
- **Première phase :** Q1 est fermer et Q2 est ouvert, D1 concernée et D2 n'est pas concernée.  
On obtient le fonctionnement en hacheur série.
- **Deuxième phase:** Q2 est fermer et Q1 est ouvert, D2 concernée et D1 n'est pas.  
Concernée. On obtient le fonctionnement en hacheur parallèle.

Ceci est, vrai dans les conditions suivantes:

- $E$  soit réversible en courant.
- $E_c$  joue convenablement son rôle de source et soit, elle aussi, réversible encourant.

On obtient alors un hacheur double, ou à deux interrupteurs, réversible en courant continu [56]. Voir la figure III.10 :

## Chapitre III : Modélisation d'un Micro-Réseau électrique



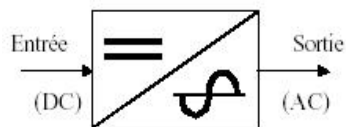
**Figure III.10:** Allure de courant/tension d'un Hacheur réversible en courant.

- Quand  $i > 0$ , le courant va de la source vers le récepteur, seul le Hacheur dévolteur fonctionne.
- Quand  $i < 0$ , le courant va du récepteur vers la source, seul le Hacheur survolteur fonctionne.
- Les tensions aux bornes du récepteur et de la source sont toujours positives.

### III.2.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur) :

#### III.2.2.1. Définition et fonctionnement:

C'est un convertisseur d'électronique de puissance, il permet la conversion de l'énergie électrique à courant continu en une autre à courant alternatif destinée à alimenter les récepteurs AC. Voir la figure III.11:



**Figure III.11:** Schéma de principe d'un Onduleur.

#### III.2.2.2 Types d'onduleur utilisé: Onduleur utilisé est de type triphasé.

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour

## Chapitre III : Modélisation d'un Micro-Réseau électrique

obtenir à la sortie trois phases décalées de  $120^\circ$ . En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue  $U$  ne soit jamais en court-circuit et pour que les circuits des courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  ne soient jamais ouverts. A fin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaires, des **IGBTs** ou des **GTOS** associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant [58]. Voir la figure III.12:

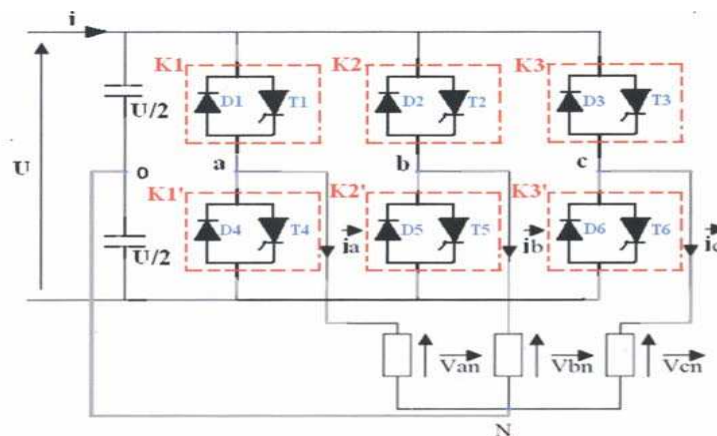


Figure III.12: Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé.

### III.2.2.3. Commande d'un onduleur triphasé :

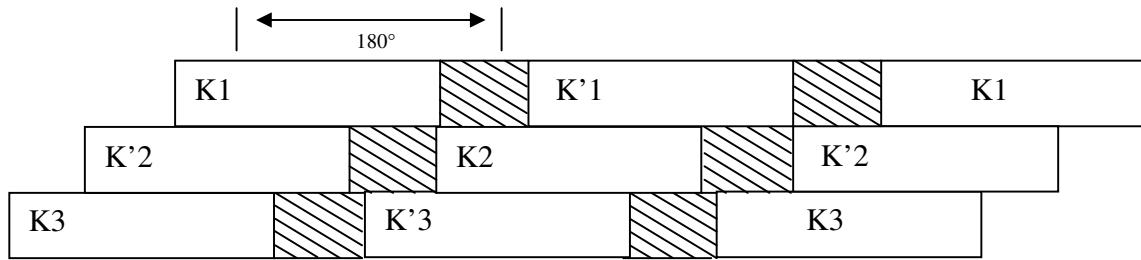
On peut commander l'onduleur de manière que :

- Commande à  $120^\circ$ .
- Commande à  $180^\circ$ .
- Commande MLI.

#### a. Commande $120^\circ$ (commande décalé) :

Dans ce cas, la commande de fermeture d'un interrupteurs ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on par le dans ce cas d'un onduleur de type  $120^\circ$ . Voir la figure III.13 :

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

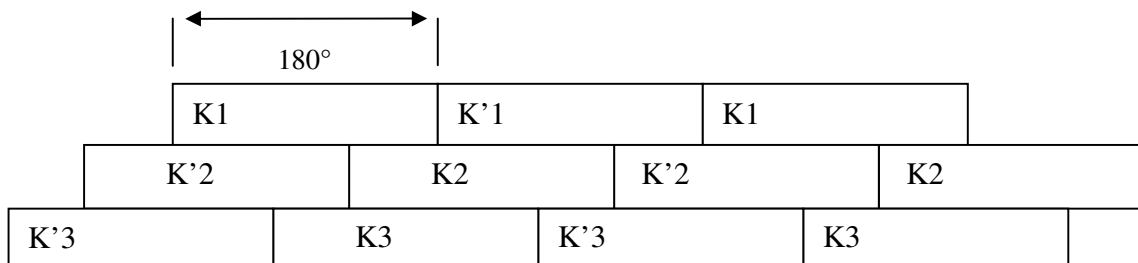


**Figure III.13:** Commande 120°.

Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant **120°**, telle que la séquence est  $K_1$ ,  $K_2$  puis  $K_3$  successivement. De même pour les interrupteurs  $K'_1$ ,  $K'_2$  et  $K'_3$  avec un décalage de **60°** par rapport à  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  [58].

### b. Commande 180° (commande pleine onde):

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°. Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur  $K_1$  est fermé pendant une demi-période (180°), et  $K'_1$  est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de  $2\pi/3$  /  $4\pi/3$  par rapport au premier bras. Voir la figure III.14 :



**Figure III.14:** Commande 180°.

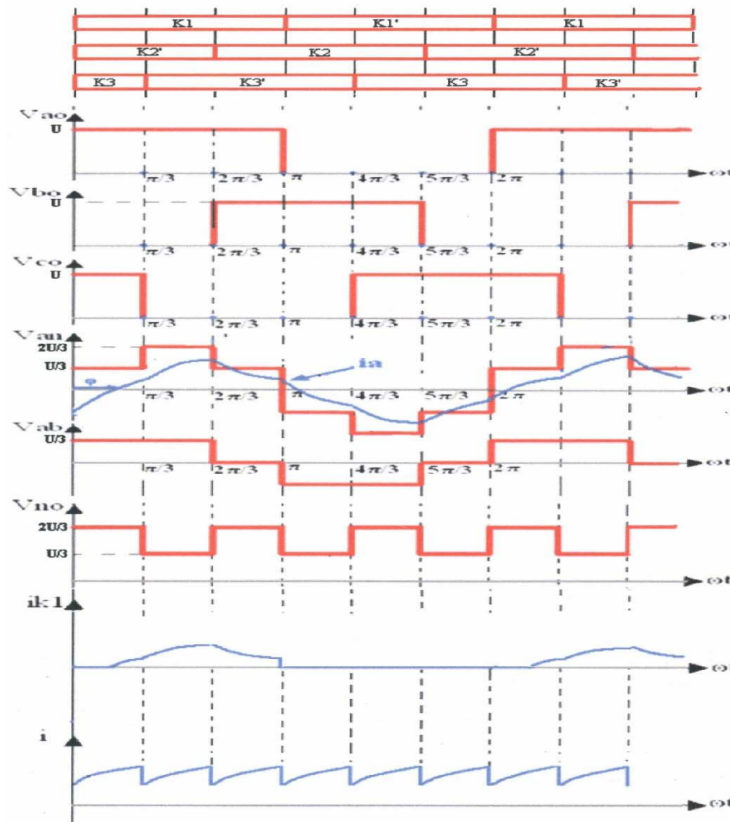
En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois [58].

- **Formes d'ondes des courants et des tensions aux bornes d'une charge RL :**

La figure III.15 illustre un exemple du tracé des formes d'ondes des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasé avec la charge **RL** montée en étoile (commande 180°) :



## Chapitre III : Modélisation d'un Micro-Réseau électrique



**Figure III.15:** Les Formes d'onde des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasé avec la charge **RL** montée en étoile (commande  $180^\circ$ ) [58].

### c. Commande MLI :

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour cela on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur, et par la conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple.

En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Elle permet de:

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge.
- Faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée [58].

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

---

❖ Le type d'onduleur dépend aussi du type de commande, certains sont commandés en courants et d'autres en tensions cela dépend du type d'interrupteurs (pour les MOSFET en tension, les IGBT et les GTO en courant).

Ce qui nous intéresse dans l'étude de notre Micro-Réseau, c'est le régime permanent.

### III.3. Systèmes de commande du micro-réseau étudié :

Ce sont les systèmes utilisés dans la commande des convertisseurs qui gouvernent notre Micro-Réseau (Hacheur et onduleur).

#### III.3.1. Système de commande du Hacheur :

La puissance fournie par le générateur Photovoltaïque est utilisée comme référence concernant la commande du Hacheur. C'est une technique qui se base sur le suivi du **MPP** appelé technique de **MPPT**.

##### III.3.1.1. Principe de la technique MPPT :

Les techniques du MPPT signifient (**Maximum Power Point Tracking** ou bien **suivi de point de puissance maximale**). Les premières utilisations du MPPT remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques [60]. Le MPP est le point de la puissance maximale fournie par un panneau Photovoltaïque, il est utilisé comme référence dans l'étude des installations Photovoltaïques. Du fait que leurs rendements sont faibles, il est donc très important de faire fonctionner le panneau PV autour du MPP pour profiter du maximum de la conversion énergétique.

##### III.3.1.2. Différents algorithmes utilisés pour la réalisation du MPPT :

Il existe plusieurs algorithmes, on peut citer les trois qui sont le plus souvent rencontrés côté pratique sont plus :

###### a. Algorithme de la tension constante (CV, Constant Voltage) :

La relation linéaire approximative liant les tensions  $V_{MPP}$  et  $V_{oc}$  du **GPV** a donné lieu à la méthode dite de la Tension Constante (**CV** : Constant Voltage).

$$V_{MPP} \cong k_1 V_{oc} \quad (III.22)$$

Où  $k_1$  est une constante de proportionnalité. Puisque  $k_1$  dépend des caractéristiques du panneau utilisé, il doit être calculé à l'avance en déterminant empiriquement  $V_{MPP}$  et  $V_{oc}$  pour différentes conditions atmosphériques. D'après les résultats de recherches, le facteur  $k_1$  est généralement compris entre 0.71 et 0.78 [62].

###### b. Algorithme du Courant constant (Constant Current) :

Cette technique provient du fait que, sous des conditions atmosphériques variables, le courant  $I_{MPP}$  est approximativement linéairement lié au courant  $I_{sc}$  du **GPV**. Il a été montré

## Chapitre III : Modélisation d'un Micro-Réseau électrique

que :

$$I_{MPP} \cong k_2 I_{sc} \quad (\text{III.23})$$

Avec  $k_2$  constante de proportionnalité. Comme pour la méthode *CV*,  $k_2$  est déterminée pour le *GPV* utilisé. La constante  $k_2$  est généralement comprise entre 0.78 et 0.92. La mesure du courant *I<sub>sc</sub>* durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant *I<sub>sc</sub>* à l'aide d'un capteur de courant.

Ceci augmente le nombre de composants et donc le coût. La puissance de sortie est réduite lors de la mesure du courant *I<sub>sc</sub>*. De plus, le *MPP* n'est jamais atteint [62].

### c. Algorithme Perturbation et Observation (P&O):

La méthode **P&O** est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. On voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ( $dP=dV>0$ ), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le *MPP*. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction.

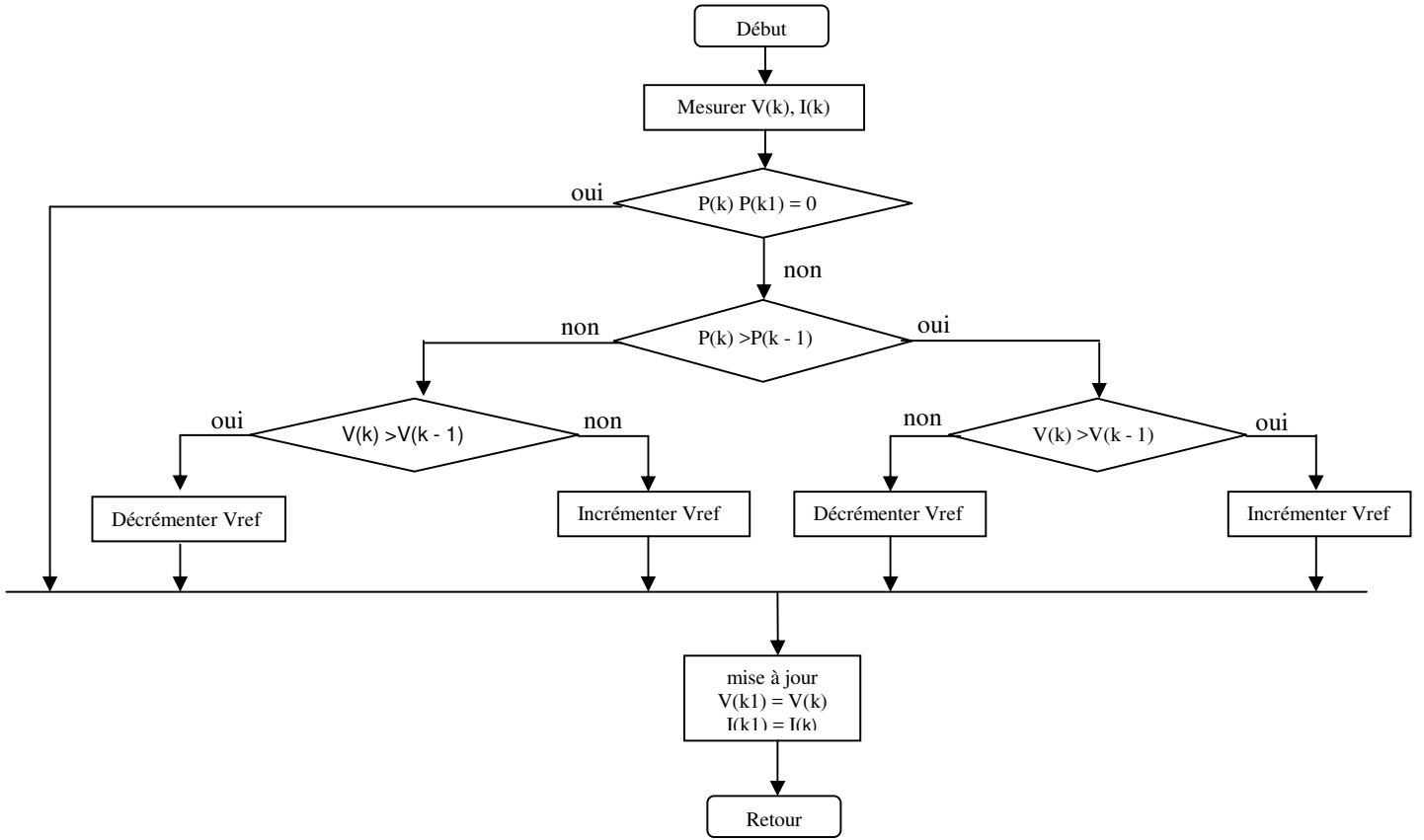
Par contre, si la puissance diminue ( $dP=dV < 0$ ), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du *MPP* [62].

L'algorithme est représenté par l'expression mathématique suivante :

$$V(K) = V(K - 1) + \Delta V \left( \frac{dP}{dV} \Big|_{V = V_{K-1}} \right) \quad (\text{III.24})$$

La figure **III.16** illustre l'organigramme de la méthode Perturbation et Observation P&O :

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique



**Figure III.16:** Organigramme de la méthode Perturbation et Observation [62].

Dans ce qui suit ; l'étude de notre Micro-Réseau ce baseras sur Algorithme Perturbation et Observation (P&O).

### III.3.1.3. Les équation gouvernant la commande du Hacheur :

C'est l'ensemble des équations différentiels citez ci-dessous :

On a: 
$$\frac{d\phi_1}{dt} = V_{dc_{ref}} - V_{dc} \quad (III.25)$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = I^* - I_L \quad (III.26)$$

Avec : 
$$I^* = K_{1p} (V_{dc_{ref}} - V_{dc}) + K_{1i} \phi_1 \quad (III.27)$$

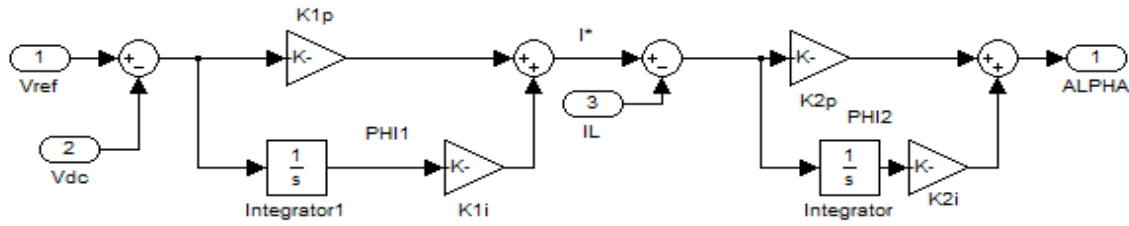
$$\alpha = K_{2p} (I^* - I_L) + K_{2i} \phi_2 - I_L \quad (III.28)$$

On obtient : 
$$\frac{d\phi_2}{dt} = K_{1p} (V_{dc_{ref}} - V_{dc}) + K_{1i} \phi_1 - I_L \quad (III.29)$$

Donc : 
$$\alpha = K_{2p} K_{1p} (V_{dc_{ref}} - V_{dc}) + K_{2p} K_{1i} \phi_1 - K_{2p} I_L - K_{2i} \phi_2 - I_L \quad (III.30)$$

Les équations de commande sont représentées par le système illustré dans la figure III.17:

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique



**Figure III.17:** Système de commande du Hacheur.

Ce système de commande est applicable dans les deux cas: Hacheur parallèle et série.

### III.3.1.4. Les équation gouvernant la commande de l'onduleur :

C'est l'ensemble des équations différentiels citez ci-dessous :

On a: 
$$\frac{d\phi_1}{dt} = V_{dref} - V_{cd} \quad (III.31)$$

$$I^* = K_{5p}(V_{dref} - V_{cd}) + K_{5i} \phi_1 \quad (III.32)$$

$$X = I^* + i_{0d}F - i_{ld} \quad (III.33)$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = X - V_{cq}w_{cf} \quad (III.34)$$

Avec :

$$V_{id} = XK_{6p} + \phi_2 K_{5p} + i_{lq}w_{Lf} + i_{ld}w_{Lf} \quad (III.35)$$

Donc :

$$V_{id} = ((K_{5p}(V_{dref} - V_{cd}) + K_{5i}\phi_1) + i_{0d}F - i_{ld}K_{6p}) + \phi_2 K_{5p} + i_{lq}w_{Lf} + i_{ld}w_{Lf} \quad (III.36)$$

On a: 
$$\frac{d\phi'_1}{dt} = V_{qref} - V_{cq} \quad (III.37)$$

$$I^* = K'_{5p}(V_{qref} - V_{cq}) + K'_{5i}\phi'_1 \quad (III.38)$$

$$X' = I^* + i_{0q}F - i_{lq} \quad (III.39)$$

$$\frac{d\phi'_2}{dt} = X - V_{cd}w_{cf} \quad (III.40)$$

Avec :

$$V_{iq} = X'K'_{6p} + \phi'_2 K'_{5p} + i_{ld}w_{Lf} + i_{lq}w_{Lf} \quad (III.41)$$

Donc :

$$V_{iq} = ((K'_{5p}(V_{qref} - V_{cq}) + K'_{5i}\phi'_1) + i_{0q}F - i_{lq}K'_{6p}) + \phi'_2 K'_{5p} + i_{ld}w_{Lf} + i_{lq}w_{Lf} \quad (III.42)$$

Les équations de commande sont représentées par le système illustré dans la figure **III.18**:

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

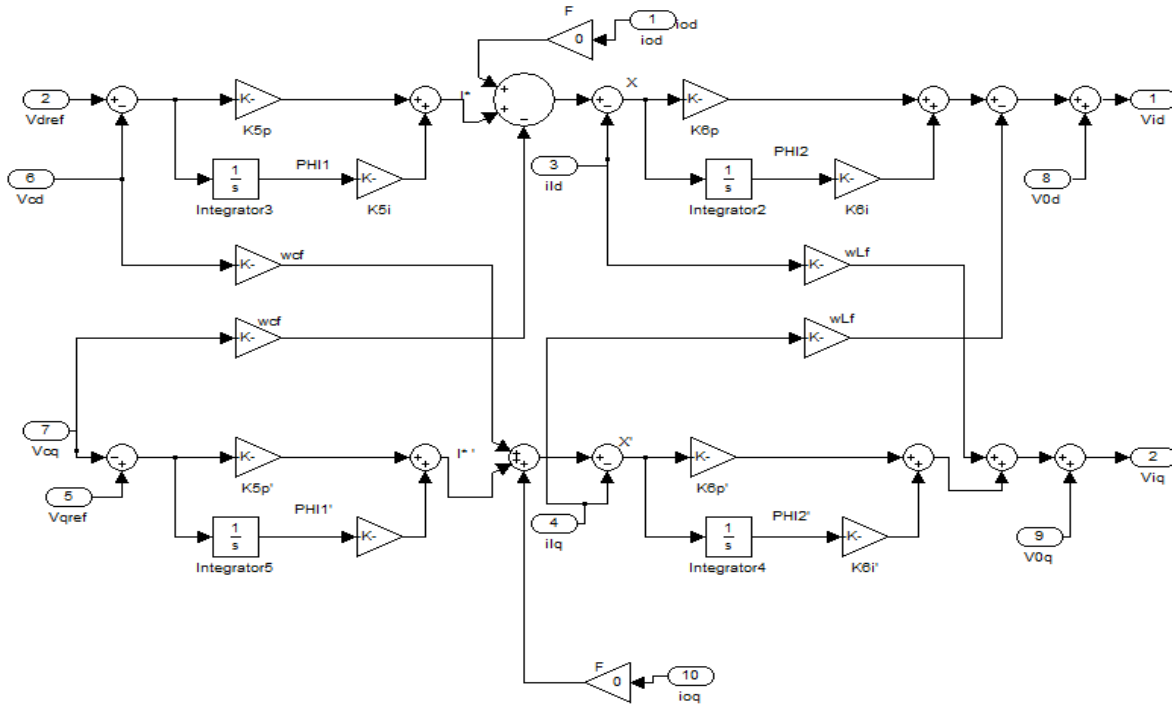


Figure III.18: Système de commande de l'onduleur.

- Transformée de Parc:  $abc \rightarrow dqo$

$$T = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.43})$$

- Calcul de puissance:

$$p = \frac{3}{2} (v_{od} i_{od} + v_{oq} i_{oq}) \quad (\text{III.44})$$

$$q = \frac{3}{2} (v_{oq} i_{od} - v_{od} i_{oq}) \quad (\text{III.45})$$

- Transformée inverse de PARCK:  $dqo \rightarrow abc$  :

$$T^{-1} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.46})$$

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

### III.3.2.Charge en courant alternatif du Micro-Réseau DC:

Cette charge est composée des éléments suivants:

- ❖ Un filtre  $LC$  pour atténuer les ondulations du courant et de la tension.
- ❖ Un câble de liaison entre l'onduleur et la charge.
- ❖ On considère comme charge  $AC$  le cas simple d'une charge  $R$ . Les équations différentielles pour chaque élément sont:

- **Filtre  $LC$  :**

Un filtre  $LC$  pour atténuer les ondulations du courant et de la tension.

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = V_{id} - V_{cd} - R_f i_{fd} + w L_f i_{fq} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = V_{iq} - V_{cq} - R_f i_{fq} - w L_f i_{fd} \end{cases} \quad (III.47)$$

$$\begin{cases} C_f \frac{di_{fd}}{dt} = i_{fd} - i_{od} - R_f i_{fd} + w C_f V_{cq} \\ C_f \frac{di_{fq}}{dt} = i_{fq} - i_{oq} - R_f i_{fq} - w C_f V_{cd} \end{cases} \quad (III.48)$$

- **Câble + Charge :**

Dans notre cas on peut regrouper les éléments de la charge et ceux du câble d'alimentation :

$$R_T = R_C + R_L \quad \text{et} \quad L_T = L_C + L_L \quad (III.49)$$

On obtient :

$$\begin{cases} L_T \frac{di_{od}}{dt} = -R_T i_{od} + w i_{oq} + (V_{cd} - V_{od}) \\ L_T \frac{di_{oq}}{dt} = -R_T i_{oq} - w i_{od} + (V_{cq} - V_{oq}) \end{cases} \quad (III.50)$$

Les équations du filtre sont représentées par le système illustré dans la figure **III.19**:

## Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique

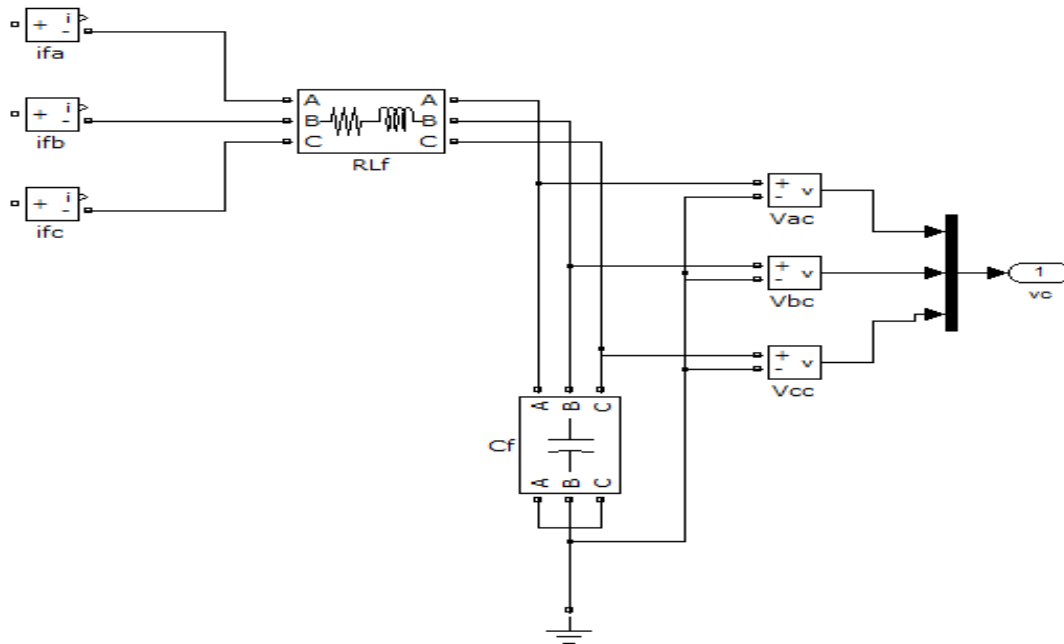


Figure III.19: Système du filtre LC.

- **Système global :**

Pour obtenir le système global il faut:

- ❖ Regrouper les équations différentielles de chaque circuit électrique avec son système de commande.
- ❖ Faire la liaison entre les différents sous système.



## **Chapitre III : Modelisation d'un Micro-Réseau électrique**

---

### **III.4.Conclusion :**

Au cours de ce chapitre, nous avons brièvement décrit les convertisseurs d'électroniques de puissance, citer les différents types ainsi leur caractéristiques.

En suite, on à citer les différents systèmes de commande utilisés dans la commande des convertisseurs tout on citant les équations différentiels de chaque commande ainsi les algorithmes de la méthode de MPPT les plus utiliser côté pratique. On à définit la méthode de l'algorithme Perturbation et Observation P&O qui sera utilisé dans notre étude.

En fin, on à citer les différentes équations différentielles qui gouvernent les éléments de notre Micro-Réseau dont le filtre, les charges et les câbles de liaison. On à préciser que le système globale est la liaison de tout les systèmes citer précédemment.

## **Chapitre IV: Simulation de cas pratiques**

# Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

---

## IV.1. Introduction :

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

Dans ce chapitre, nous allons on premier lieu réalisé les montages sous MATLAB/SIMULINK du Hacheur série (BOOST), parallèle (BUCK) et l'onduleur triphasé accompagné de leurs charges.

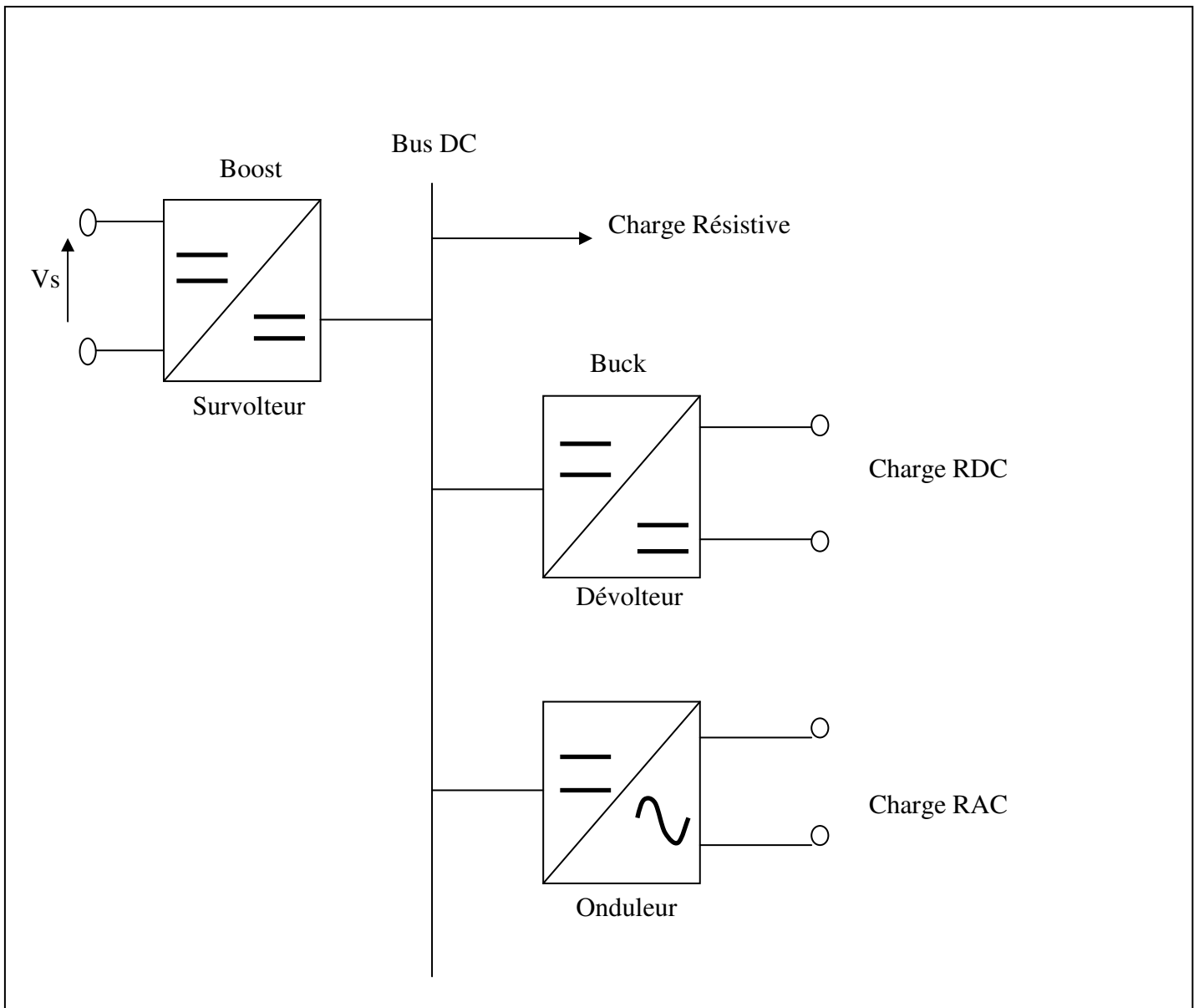
Ensuite, on décrira brièvement les étapes à suivre pour la simulation de ce système en envisageant des scénarios tel que l'influence de la charge et de la tension de la source sur le plan de la tension et du courant des charges, de mètre les résultats obtenue pour chaque élément tout en les interprétant et de donner quelque explications.

Enfin, on terminera par donner quelques avantages et inconvénients des Micro-Réseaux électrique selon les critères techniques, économiques et environnementaux.

## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

### IV.2. Système global :

Le schéma théorique du système global du Micro-Réseau étudié est illustré sur la figure IV.1 :



**Figure IV.1:** Le schéma théorique du système global du Micro-Réseau étudié.

## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

### IV.3. Simulation du système global avec MATLAB :

Le schéma de simulation du système globale du Micro-Réseau étudié avec MATLAB est illustré sur la figure A. (voir l'annexe A).

Le déroulement ce fait en supposant trois scénarios différents qui sont les suivants :

#### IV.3.1. Alimentation d'une charge résistive :

Le but de ce scénario est d'étudier deux cas dont l'influence de la charge et de la tension sur le plan du courant et de la tension.

##### Cas a. Etude de l'influence de la charge :

- On fixe la tension de la source  $V_s$  à 500 v
- On introduit les valeurs suivantes :  
Pour le BOOST et BUCK :  $P=2000W$  et  $t$  allant de 0 à 1s.  
 $P=3000W$  et  $t$  allant de 1 à 2s.  
Pour l'Onduleur :  $P=5000W$  et  $t$  allant de 0 à 0.1s.  
 $P=15000W$  et  $t$  allant de 0.1 à 0.2s.

##### Cas b. Etude de l'influence de la tension :

- On fixe la puissance de la charge à 2000W pour le BOOST et BUCK et 5000 pour l'Onduleur.
  - On introduit les valeurs suivantes:  $V_s=500v$  et  $t$  allant de 0 à 1s
- |                                    | Hacheur | Onduleur     |
|------------------------------------|---------|--------------|
| $V_s=550v$ et $t$ allant de 1 à 2s |         | 0.04 à 0.08s |
| $V_s=500v$ et $t$ allant de 2 à 3s |         | 0.08 à 0.12s |
| $V_s=450v$ et $t$ allant de 3 à 4s |         | 0.12 à 0.16s |
| $V_s=400v$ et $t$ allant de 4 à 5s |         | 0.16 à 0.2s  |

Sachant que la charge résistive et le BOOST sont décrits comme ci de suite:

#### ❖ Hacheur survolteur (BOOST) :

Le schéma de simulation du Hacheur survolteur avec MATLAB est illustré sur la figure B.1, ainsi que les paramètres des systèmes de commande et de puissance qui sont représenté dans les tableaux B.1 et B.2 (voir l'annexe B).

#### ❖ Charge résistive :

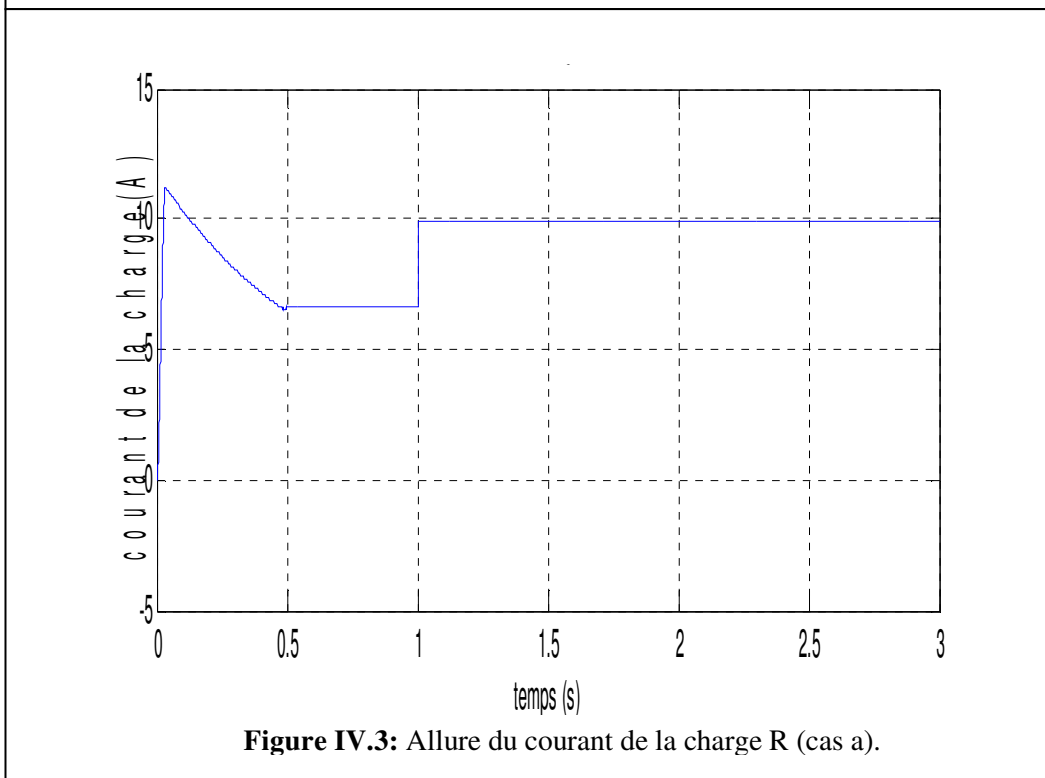
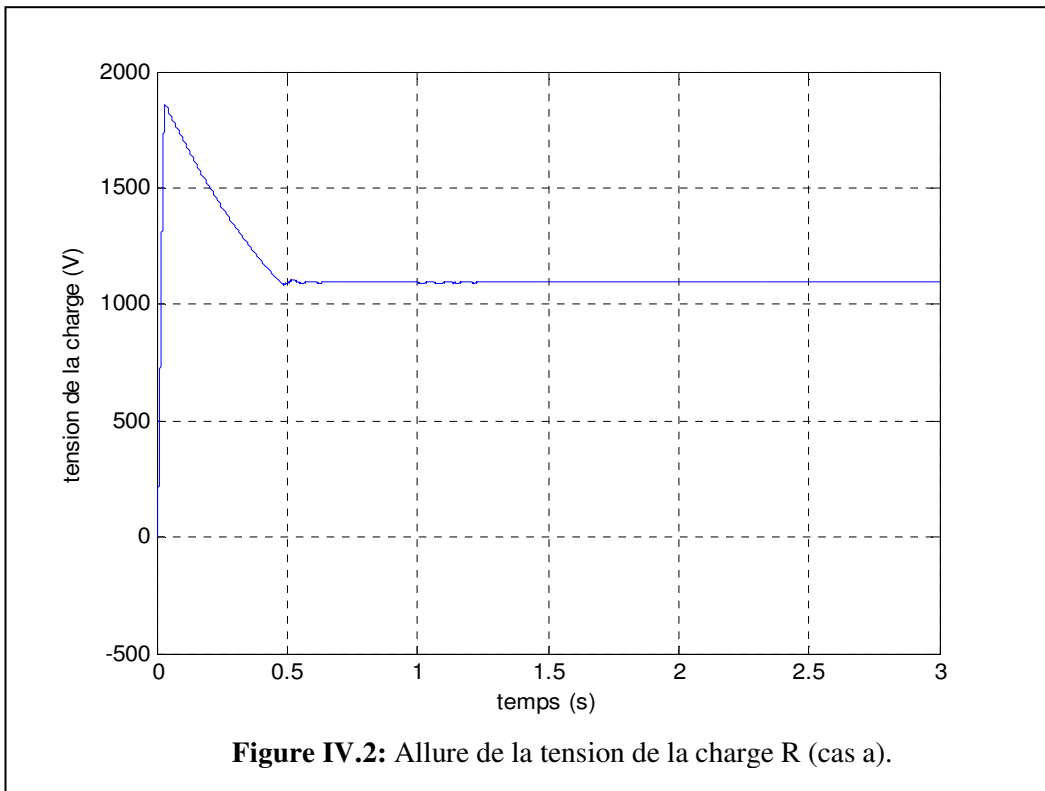
Le schéma de simulation de la charge avec MATLAB est illustré sur la figure B.2 (Voir l'annexe B).

#### ✓ Influence de la charge :

Visualisation de la tension et du courant de la charge R. Les résultats sont les suivants :

## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

Allures des grandeurs  $V_R$  et  $I_R$ : Elles sont illustrées dans les figures IV.2 et IV.3 :

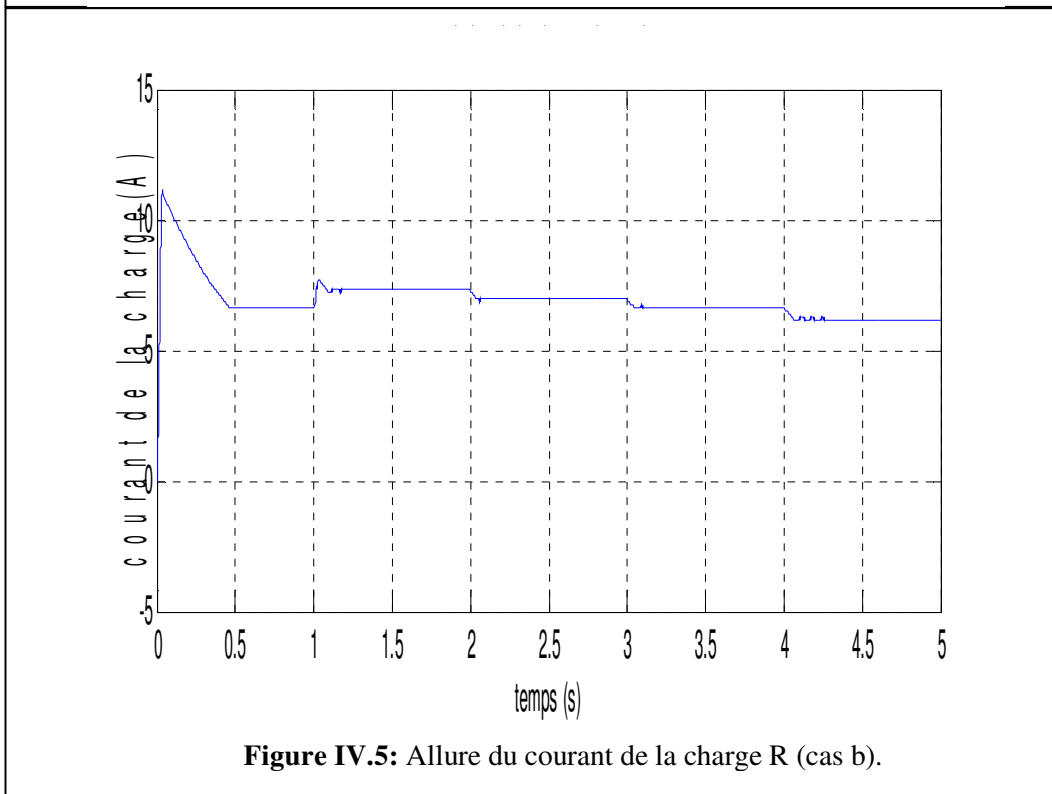
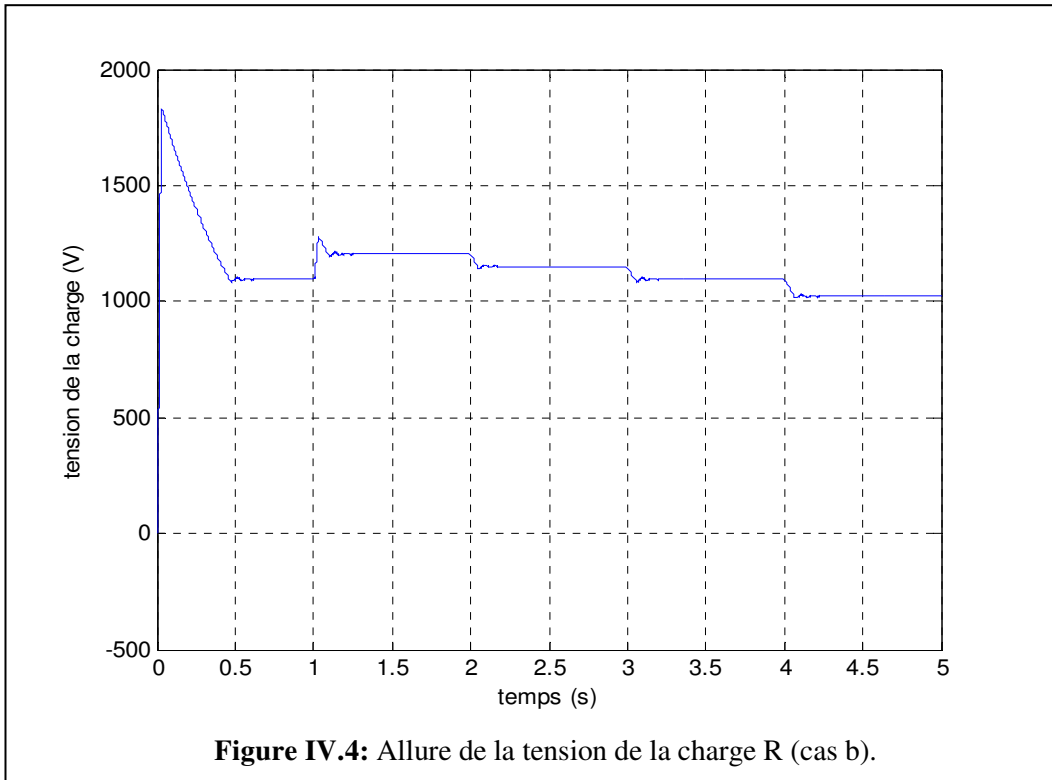


### ✓ Influence de la tension :

Visualisation de la tension et du courant de la charge R. Les résultats sont les suivants :

## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

Allures des grandeurs  $V_R$  et  $I_R$ : Elles sont illustrées dans les figures IV.4 et IV.5:



## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

---

- L'allure de la tension obtenue lors de la simulation n'est pas influencée par la variation de la charge.
- Pour une tension fixe, toute augmentation de la charge engendre l'augmentation du courant absorbé par cette charge.
- Comme tout autre système, on constate la présence du régime transitoire et permanent pour les deux signaux.
- La variation de la tension de la source influe légèrement sur la tension et le courant de la charge
- L'allure de la tension et du courant sont de même nature concernant le cas de l'influence de la tension du fait que la charge est de type résistif.

### IV.3.2. Alimentation d'une charge DC:

La simulation se fait de la même manière comme dans la charge résistive. Sachant que la charge DC et le BUCK sont décrits comme ci de suite:

#### ❖ Hacheur dévolteur (BUCK) :

Le schéma de simulation du Hacheur survolteur avec MATLAB est illustré sur la figure **B.1**, ainsi que les paramètres des systèmes de commande et de puissance qui sont représentés dans les tableaux **C.1** et **C.2** (voir l'annexe C).

#### ❖ Charge DC :

Le schéma de simulation de la charge avec MATLAB est illustré sur la figure **C.2** (Voir l'annexe C).

#### ✓ Influence de la charge :

Visualisation de la tension et du courant de la charge R. Les résultats sont les suivants :

Allures des grandeurs  $V_{DC}$  et  $I_{DC}$ : Elles sont illustrées dans les figures **IV.6** et **IV.7** :



## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

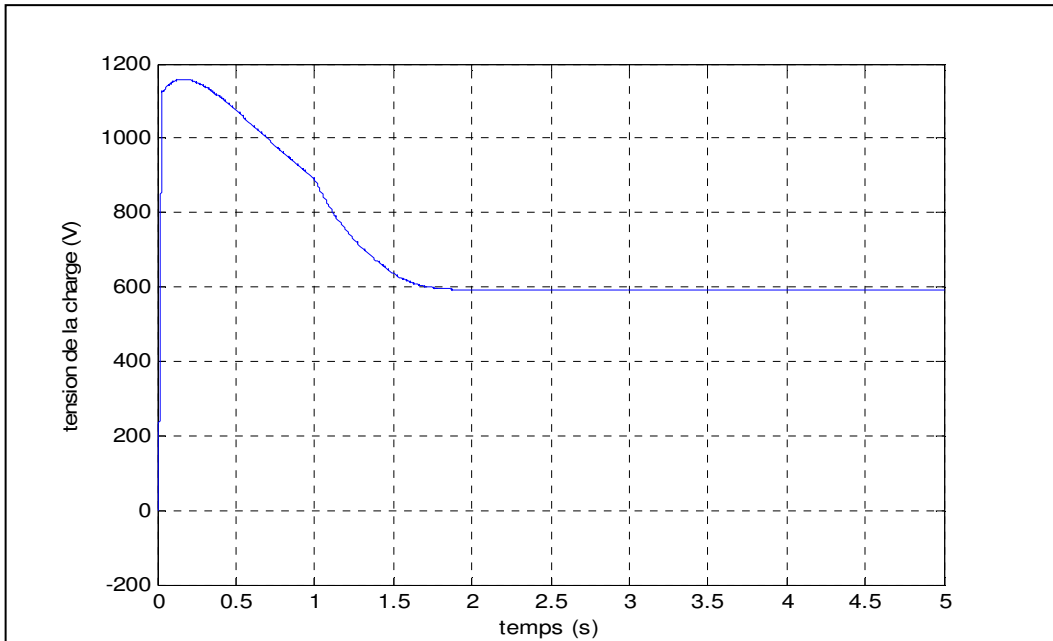


Figure IV.6: Allure de la tension de la charge DC (cas a).

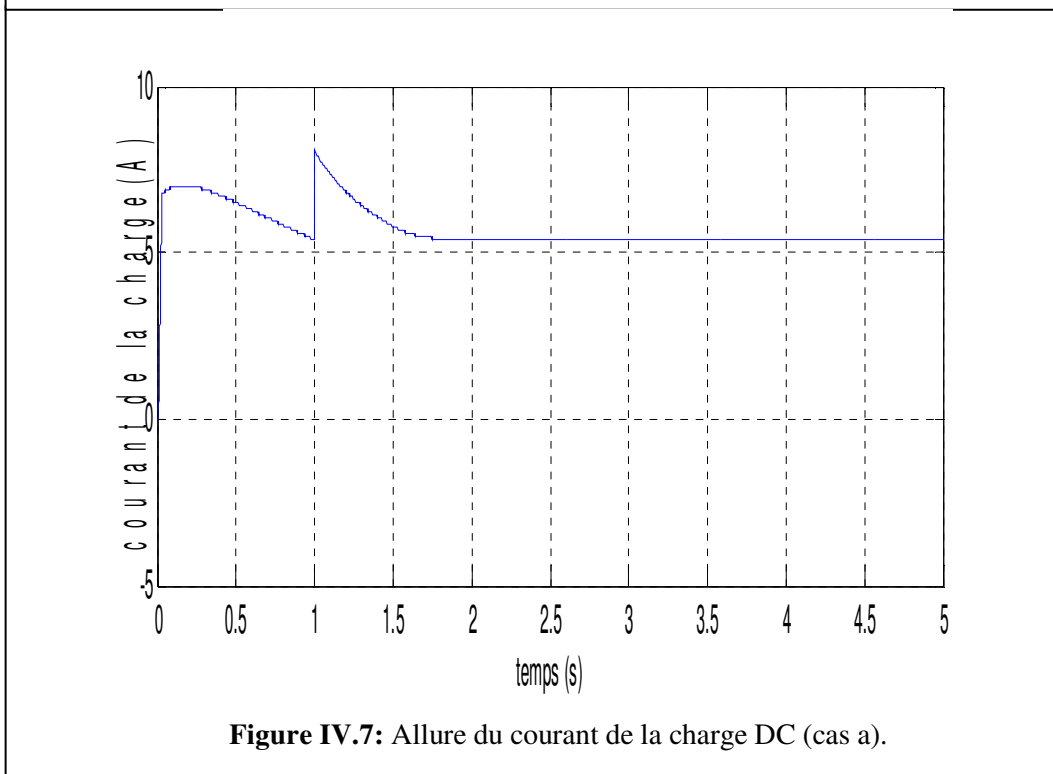


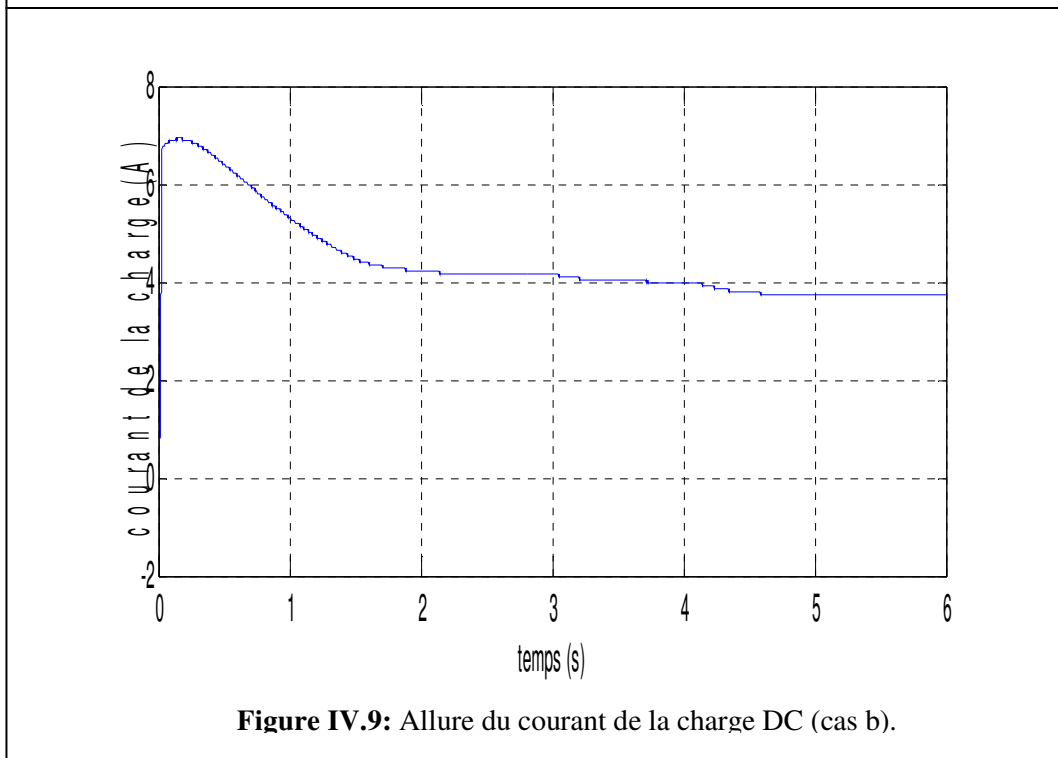
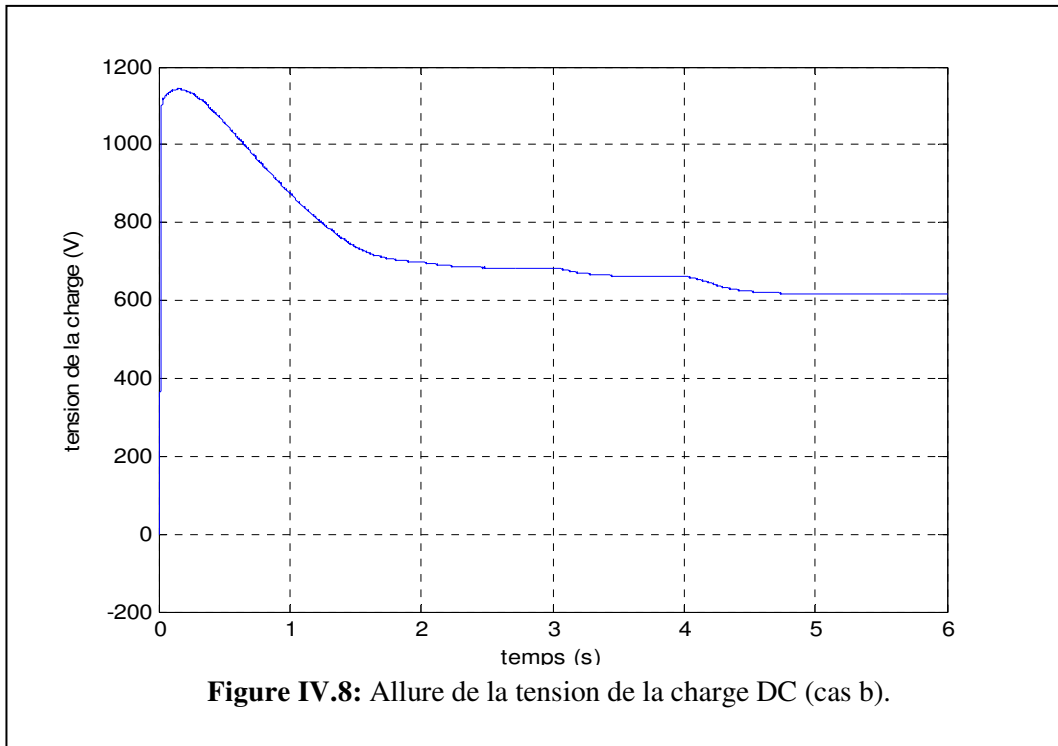
Figure IV.7: Allure du courant de la charge DC (cas a).

### ✓ Influence de la tension :

Visualisation de la tension et du courant de la charge R. Les résultats sont les suivants :

## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

Allures des grandeurs  $V_{DC}$  et  $I_{DC}$ : Elles sont illustrées dans les figures IV.8 et IV.9 :



➤ **Interprétation des résultats:**

- Les allures de la charge DC sont de même nature avec celles de la charge résistive.
- Il ya une différences entre les signaux de sortie des deux convertisseurs.

## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

- L'amplitude de la tension du Hacheur survolteur est supérieure à celle de la source; par contre celle du Hacheur dévolteur et inférieure à celle du survolteur (La tension de la charge du Hacheur devolteur est supposer faible par rapport à celle Hacheur survolteur)

### IV.3.3. Alimentation d'une charge AC:

La simulation se fait de la même manière comme dans la charge résistive.

Sachant que la charge AC et l'Onduleur triphasé sont décrits comme ci de suite:

#### ❖ Onduleur triphasé :

Le schéma de simulation de l'Onduleur triphasé avec MATLAB est illustré sur la figure D.1, ainsi que les paramètres des systèmes de commande et de puissance qui sont représenté dans les tableaux D.1 et D.2 (voir l'annexe D).

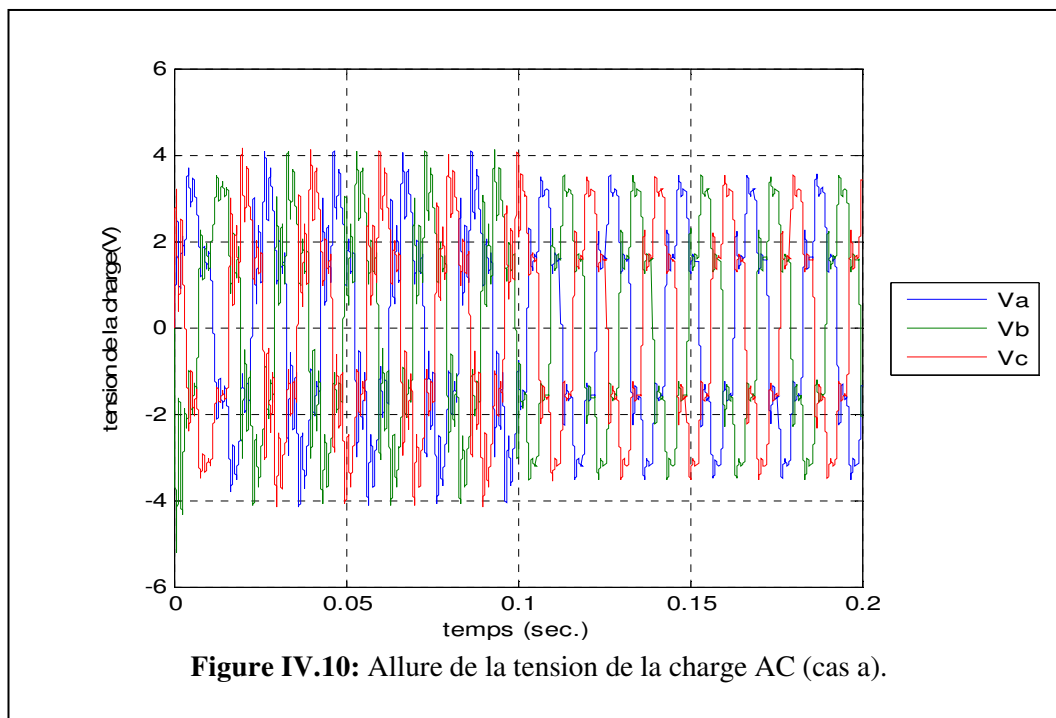
#### ❖ Charge AC :

Le schéma de simulation de la charge avec MATLAB est illustré sur la figure D.2 (Voir l'annexe D).

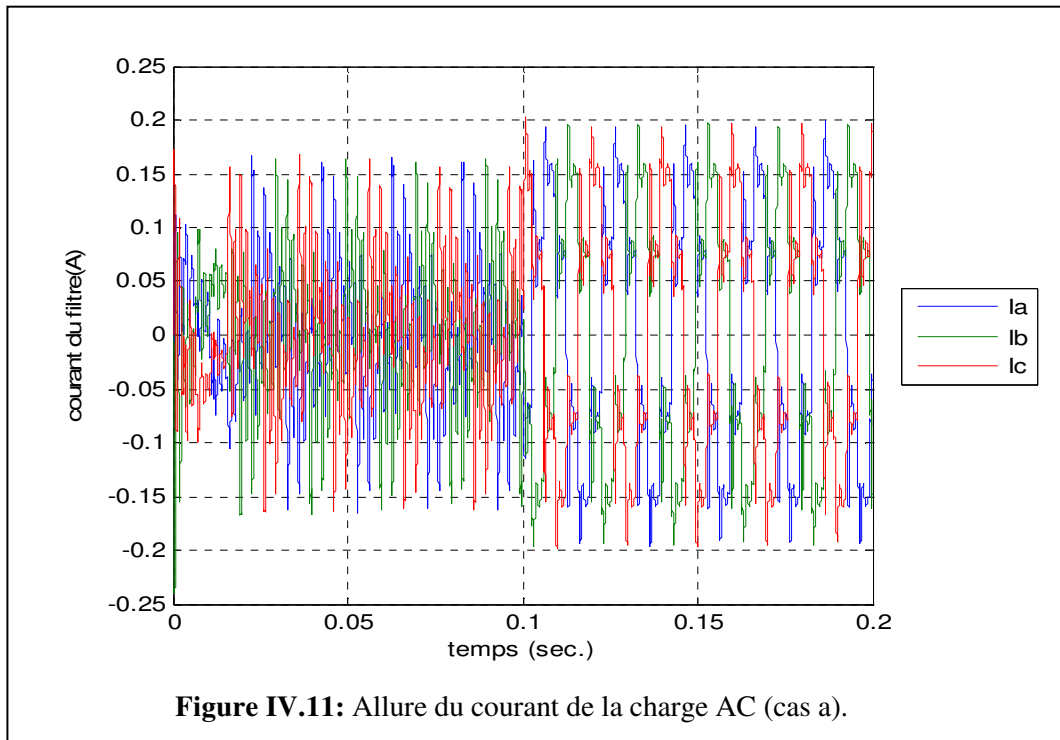
#### ✓ Influence de la charge :

Visualisation de la tension et du courant de la charge R. Les résultats sont les suivants :

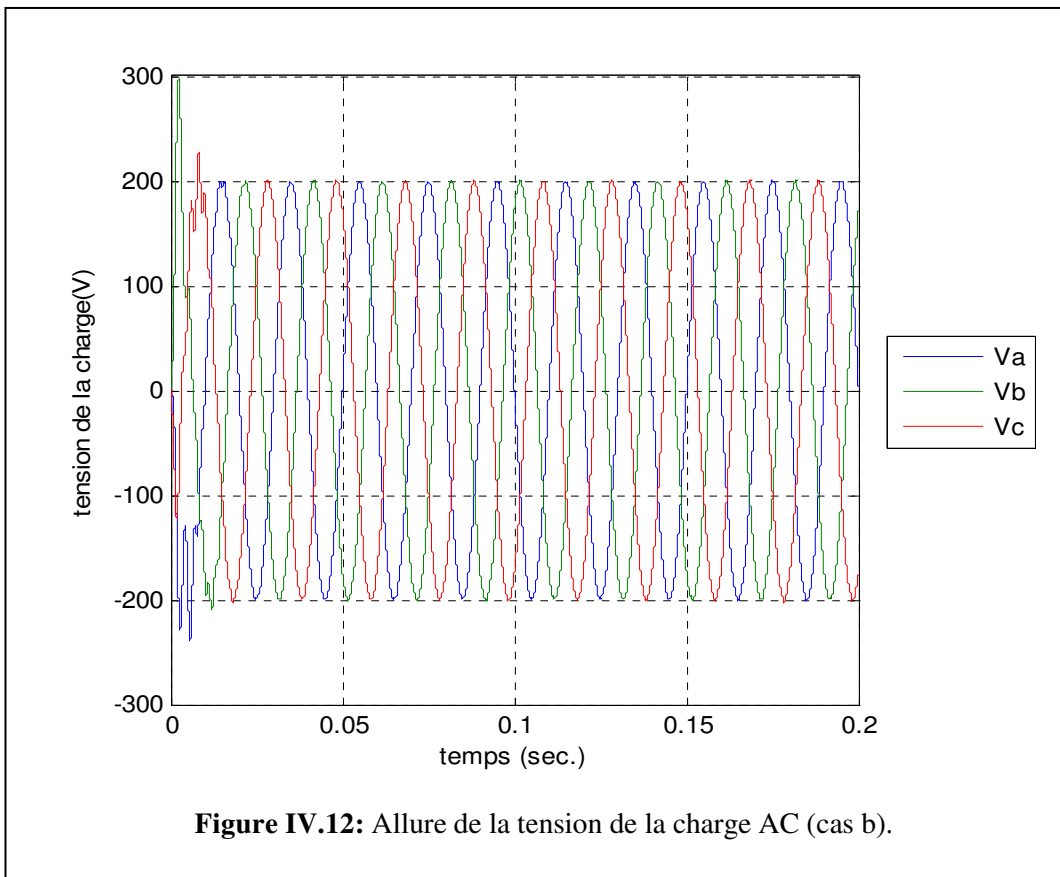
Allures des grandeurs  $V_{AC}$  et  $I_{AC}$ : Elles sont illustrées dans les figures IV.10 et IV.11 :



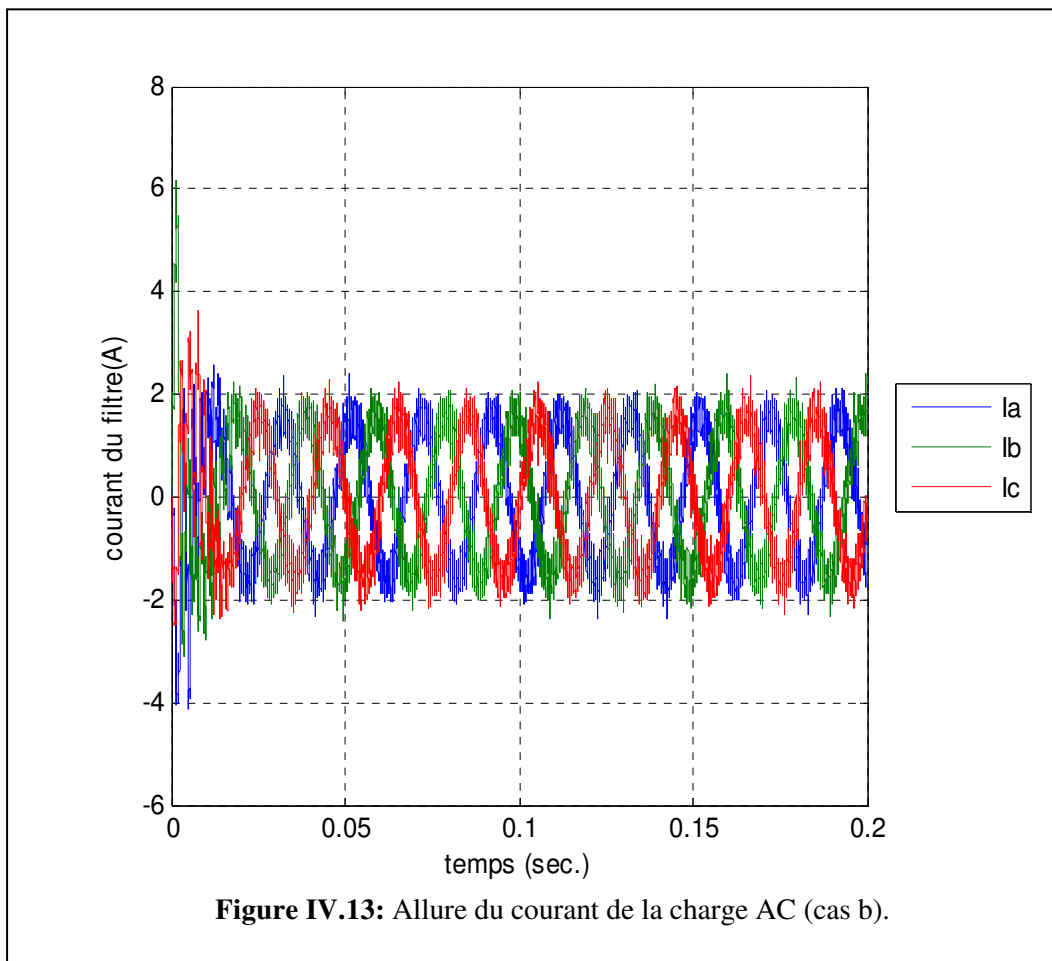
## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques



Allures des grandeurs  $V_{AC}$  et  $I_{AC}$ : Elles sont illustrées dans les figures IV.12 et IV.13 :



## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques



### ➤ Interprétation des résultats:

- L'allure de la tension obtenue lors de la simulation n'est pas influencée par la variation de la charge.
  - Pour une tension fixe, toute augmentation de la charge engendre l'augmentation du courant absorbé par cette charge.
  - Comme tout autre système, on constate la présence du régime transitoire et permanent pour les deux signaux.
  - La tension et le courant de la charge ne dépendent pas de la tension de la source, l'onduleur est dimensionné de telle sorte à délivrer une tension alternative fixe.
- ❖ Pour améliorer la qualité des signaux de sortie des convertisseurs, il est nécessaire de faire une étude de stabilité pour le système, afin d'obtenir des résultats plus satisfaisants.

## Chapitre IV : Simulation de cas pratiques

---

### IV.4.Conclusion:

Au cours de ce chapitre, nous avons pu voir le montage avec MATLAB/SIMULINK d'un exemple pratique de Micro-Resau alimenté en courant continue.

Ensuite, on à envisagé des scenarios différents afin de voir les éléments capable d'influencé le fonctionnement de tout le système tout en donnant des interprétations et quelques explications.

Enfin, on à terminé avec des avantges et inconvénient des Micro-Réseaux.

La simulation de se système nous à permis de compendre le comportement des éléments constituent un Micro-Réseau (convertisseurs, filtres et charges).

## **Conclusion générale**

## Conclusion général

---

Le concept du micro-réseau est une méthode intéressante qui permet d'intégrer efficacement la production Photovoltaïque dans le réseau électrique et de réaliser la gestion intelligente de l'énergie. Le micro-réseau doit répondre à l'exigence d'efficacité énergétique.

L'objectif principal de ce mémoire était l'analyse d'un Micro-Réseau alimenté en courant continue dans la source d'alimentation est une centrale de production photovoltaïque.

Le premier chapitre à donner l'opportunité de comprendre le contexte des Micro-Réseaux, de découvrir les différents types d'énergies renouvelables ainsi que les éléments de bases constitutifs d'un Micro-Réseau.

Dans le deuxième chapitre on à pu décrire brièvement les deux parties principale du Micro-Réseau étudier dans le Photovoltaïque et les piles à combustibles ainsi le rôle de base de chaque un.

Le troisième chapitre nous à permit de décrire les différents convertisseurs statiques utilisé dans notre Micro-Réseau, citez quelques algorithmes nécessaire pour la réalisation du MPPT ainsi que les équations gouvernant le système globale.

Le dernier chapitre nous à permit de voir l'impacte des caractéristiques de la charge et de la tension délivrée par une centrale Photovoltaïque sur le plan de la tension et du courant au niveau des convertisseurs et des charges tout en terminant avec quelques avantages et inconvénients des Micro-Réseaux.



# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

[1] : Peter Asmus, The Microgrid Revolution, In : RENEWABLE ENERGY RESILIENT ANOGRIDS, MICROGRIDS AND VIRTUAL POWER PLANTS, [en ligne], Navigant Research, 6 novembre 2009.

[2] : Iris Fostiez, Johan De Bruyn et Sofie Brouw, tout sur l'énergie Bruxelles. Une initiative de Sibelga, Energide.be, (En ligne) (2009, 4 avril 2018).

[3] : Hongwei WU, Etude et analyse globale de l'efficacité énergétique d'un micro - réseau urbain à courant continu, [en ligne], thèse, Génie Electrique, Laboratoire AVENUES, EA 7284, 8 décembre 2017, 152 pages, pdf, (19 mars 2020).

[4]:Site web :

[https://www.researchgate.net/profile/Rabah\\_Medjoudj2/publication/307957923/figure/fig1/AS:404535978807296@1473460301172/Systeme-traditionnel-photovoltaique-groupe-electrogene-En-periode-densoleillement.png](https://www.researchgate.net/profile/Rabah_Medjoudj2/publication/307957923/figure/fig1/AS:404535978807296@1473460301172/Systeme-traditionnel-photovoltaique-groupe-electrogene-En-periode-densoleillement.png) ,(19 mars 2020).

[5] : Site web : [https://www.studer-innotec.com/media/image/0/thumbnail\\_16\\_9/6-du-courant-alternatif-de-qualite-pour-tous-les-appareils-onduleur-fr.png](https://www.studer-innotec.com/media/image/0/thumbnail_16_9/6-du-courant-alternatif-de-qualite-pour-tous-les-appareils-onduleur-fr.png) ,(19 mars 2020).

[6] : Azeddine HOUARI, CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE MICRO-RÉSEAUX AUTONOMES ALIMENTÉS PAR DES SOURCES PHOTOVOLTAÏQUES, [en ligne], thèse, Génie Electrique, Laboratoire GREEN (Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy) Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique, Université de Lorraine, 7 décembre 2012, 165 pages, pdf.

[7] : Site web

[https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcSTQ\\_3EG2wXtG2s8t2TvAlh2qP2aDjV8MlcuQ&usqp=CAU](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcSTQ_3EG2wXtG2s8t2TvAlh2qP2aDjV8MlcuQ&usqp=CAU) ,(22 mars 2020).

[8] : Site web : [https://www.hevs.ch/media/image/0/base/microgrids\\_ibats1.jpg](https://www.hevs.ch/media/image/0/base/microgrids_ibats1.jpg) , (26 mars 2020).

[9] : Daniel Cadilla (Azimut 360),Mireia Gil (Azimut 360),Cristian Ros (Azimut 360),Cristina Gil (Azimut 360),

Nicola Bugati (ECREEE), **Micro-réseaux photovoltaïques hybrides**, Tomaison, [en ligne], Plaça del Guinardó, 12, Local 1 - 08041 Barcelona, Juillet 2017, 124pages, (Titre de la collection, n° de la collection), pdf.

[10]: Site web:

[https://www.researchgate.net/profile/L\\_Barelli/publication/279259912/figure/fig2/AS:669559665217563@1536646872826/Integration-du-systeme-hybride-SOFC-GT-au-micro-reseau.png](https://www.researchgate.net/profile/L_Barelli/publication/279259912/figure/fig2/AS:669559665217563@1536646872826/Integration-du-systeme-hybride-SOFC-GT-au-micro-reseau.png) ,( 27 mars 2020).

[11] : Site web: <https://romanalibera.ro/imagini/880/660/crop/704234-1515171468-proiect-controversat-noi-parcuri-eoliene-de-1000-mw-in-romania.jpg> , (27 mars 2020).

[12] : Site web: [https://foraloc.fr/wpcontent/uploads/2016/03/geothermie\\_basse\\_energie.gif](https://foraloc.fr/wpcontent/uploads/2016/03/geothermie_basse_energie.gif) , (31 mars 2020).

[13]: Site web: [https://lepetitjournal.com/sites/default/files/inline-images/custom\\_5b1e753c402d3.jpg](https://lepetitjournal.com/sites/default/files/inline-images/custom_5b1e753c402d3.jpg) , (31 mars 2020).

## Bibliographie

---

[14]: Site web: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTfvosAtp4NS8rgFba7Gf2vDPMBorgAIPsn2QFAwi-skUaQ-CZR&usqp=CAU> , (01 mai 2020).

[15]: Site web: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Groupe\\_%C3%A9lectrog%C3%A8ne\\_1.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Groupe_%C3%A9lectrog%C3%A8ne_1.JPG) (01 mai 2020).

[16]: Site web: [https://rivieres.info/patri/grandmaison\\_fichiers/image002.jpg](https://rivieres.info/patri/grandmaison_fichiers/image002.jpg) , (01 mai 2020).

[17] : Commission de régulation de l'énergie de France, SMART GRID-CRE, (en ligne), <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-technologies> , (02 mai 2020).

[18]: Site web: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTb9LczX6XjvyFD\\_QnRp0Z8LKP4nG-y7G637AjvujLLkRXUGOws&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTb9LczX6XjvyFD_QnRp0Z8LKP4nG-y7G637AjvujLLkRXUGOws&usqp=CAU) , (02 mai 2020).

[19]: Site web: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcQmfrGO2oc-W6-wVG1Xc7085IFRWQnkaRK5FcLWIP7-VysOCp2X&usqp=CAU> , (02 mai 2020).

[20]: Site web: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inline-images/Innovation%20et%20industrie/Stockage%20d'%C3%A9nergie/Stockage%20%C3%A9nergie%20batterie%20Redox.JPG> ,(02 mai 2020).

[21]: Site web: [https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/smart\\_grids.cre.reselecfutur-cs2-v6\\_zoom.jpg](https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/smart_grids.cre.reselecfutur-cs2-v6_zoom.jpg) , (04 mai 2020).

[22] : Site web: <https://www.elprocus.com/wp-content/uploads/2014/05/Zigbee-Technology.png>

[23] : Site web : [https://blog.engineering.publicissapient.fr/wp-content/uploads/2018/08/image2018-5-15\\_22-30-2.png](https://blog.engineering.publicissapient.fr/wp-content/uploads/2018/08/image2018-5-15_22-30-2.png), (05 mai 2020).

[24] : Site web : <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcQI3TFzKpmueDwbYubv7PKCuIC3-wpH4PkYuw&usqp=CAU> ,(05 mai 2020).

[26] : Site web : [https://panneaux-photovoltaïques.mes-guides.com/images\\_upload/cellule\\_photovoltque.jpg](https://panneaux-photovoltaïques.mes-guides.com/images_upload/cellule_photovoltque.jpg) , (05 mai 2020).

[25] : [Jacques Ballieu](#), l'Histoire de l'énergie solaire, **In** : l'encyclopédie libre, [en ligne], Tome ou volume, Wekipidia Foundation, USA, 29 mars 2020, 6 pages.

[27] : BERREZZOUG Hanane, Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, [en ligne], Mémoire de MASTER, PHYSIQUE DES MATERIAUX, Université Dr Moulay Tahar de Saida, Université de Saida, 09 / 06 /2016, 75 pages, pdf.

[28] : Site web : [https://www.researchgate.net/profile/Djaber\\_Berrian/publication/301487491/figure/fig13/AS:](https://www.researchgate.net/profile/Djaber_Berrian/publication/301487491/figure/fig13/AS:)

## Bibliographie

---

[667936184348686@1536259804567/Schema-equivalent-dune-cellule-photovoltaique.ppm](mailto:667936184348686@1536259804567/Schema-equivalent-dune-cellule-photovoltaique.ppm), (06 mai 2020).

[29] : M MEHIAOUI, Généralités sur les technologies des cellules solaires, [en ligne], 2016, université de tlemcen, 2016, 32 pages, pdf.

[30]: Site web: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTfakILz\\_fJ-VAStC1eA1Mc7HYRJlhRDrcDNjvh6-3kq2IEtxKV&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTfakILz_fJ-VAStC1eA1Mc7HYRJlhRDrcDNjvh6-3kq2IEtxKV&usqp=CAU) , (09 mai 2020).

[31]: Site web:<https://image.made-in-china.com/202f0j10BrCfQcbqYvoT/156mm-Monocrystalline-Silicon-4bb-Solar-Cell-Solar-Panel.jpg> , (09 mai 2020).

[32]: Site web: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcQkavr1J1E29uOPe2gs8cQlGLTd4tdbTAwyew&usqp=CAU> , (14 mai 2020).

[33]: Site web: [https://www.industrie-techno.com/mediatheque/8/5/8/000027858\\_600x400\\_c.jpg](https://www.industrie-techno.com/mediatheque/8/5/8/000027858_600x400_c.jpg) , (15 mai 2020).

[34]: Site web: [https://lh5.googleusercontent.com/CNUCxz\\_15rP0Z6y4YNFEI8Bt2CAGYBPBlxj9-6K-7aGHppDSfDerw0LAHR9nrLxc5FjOKNmetQaCkOJ0XIRZ6Id9OLCnHn7mDyPzaQbtQMCOjGwGHYpeC9nWCUHjaX01d3wXmh3iTtmsKX6tqg](https://lh5.googleusercontent.com/CNUCxz_15rP0Z6y4YNFEI8Bt2CAGYBPBlxj9-6K-7aGHppDSfDerw0LAHR9nrLxc5FjOKNmetQaCkOJ0XIRZ6Id9OLCnHn7mDyPzaQbtQMCOjGwGHYpeC9nWCUHjaX01d3wXmh3iTtmsKX6tqg) , (18 mai 2020).

[35] : Azeddine HOUARI, CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE MICRO-RÉSEAUX AUTONOMES ALIMENTÉS PAR DES SOURCES PHOTOVOLTAÏQUES, [en ligne], thèse, Génie Electrique, Laboratoire GREEN (Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy) Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique, Université de Lorraine, 7 décembre 2012, 165 pages, pdf.

[36]: Site web: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcT6MNBCeS5YaRO\\_G0VzcBDYoAvF1CiKM2xWuQIXOFazlwIBKlbU&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcT6MNBCeS5YaRO_G0VzcBDYoAvF1CiKM2xWuQIXOFazlwIBKlbU&usqp=CAU) , (20 mai 2020).

[37]: Site web: <https://www.memoireonline.com/05/09/2066/Les-pompe-solaires--Dimensionnement-dune-station-de-pompage-en-zone-maracher14.png> , (20 mai 2020).

[38]: Site web: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcSL3-rQ6clzi46zQcwYAw-fiA-eZogPrFks9K5GTVoJd1rk7fv8&usqp=CAU> , (20 mai 2020).

[40] Site web: <https://www.memoireonline.com/07/08/1433/etude-effet-temperature-parametres-cellule-solaire-organique51.png> , (2020 mai 2020).

[41]: Site web: [https://entraide-humanum.org/content/uploads/2018/11/09\\_branchement1\\_panneaux\\_photovoltaiques.jpg](https://entraide-humanum.org/content/uploads/2018/11/09_branchement1_panneaux_photovoltaiques.jpg) , (20 mai 2020).

[42]: Site web: <https://1.bp.blogspot.com/-ibQDgF-lyl0/UAv3BeMwLVI/AAAAAAAAAAB8/coYX7nFoB78/s1600/Branchement+panneaux+solaire+en+s%C3%A9rie.JPG> , (22 mai 2020).

## Bibliographie

---

[43]: Site web: [https://cdn10.bigcommerce.com/s-fhch/product\\_images/uploaded\\_images/image004.png](https://cdn10.bigcommerce.com/s-fhch/product_images/uploaded_images/image004.png) ,(22 mais 2020).

[44]: Site web: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcSAFAJyTaVY3cMZA-9S5iByTyw\\_2MRR91eOPLshQVp-IO6fuwwC&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcSAFAJyTaVY3cMZA-9S5iByTyw_2MRR91eOPLshQVp-IO6fuwwC&usqp=CAU) , (22 mais 2020).

[45] : Zhiming ZHANG, Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible, [en ligne], THÈSE DE DOCTORAT, Mécanique, L'UNIVERSITÉ D'ÉVRY-VAL D'ESSONNE, LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET D'ÉNERGÉTIQUE D'ÉVRY, 30 /11/2010, 139 pages, pdf.

[46]: Site web: <https://www.h2sys.fr/wp-content/uploads/2016/01/image3.png> , (23 mais 2020).

[47] : Idris SADLI, MODELISATION PAR IMPEDANCE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEM POUR UTILISATION EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE, [en ligne], THÈSE DE DOCTORAT, Génie Electrique, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 07/12/ 2006, 174 pages, pdf.

[48] : Site web: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/PEMFC-fr.gif> , (30 mai 2020).

[49] : Mr TAMRABET MONSAF, INFLUENCE DES ECOULEMENTS DES GAZ DANS LES CANAU SUR LA CONSOMMATION DES REACTIFS DANS UNE PILE À COMBUSTIBLE DE TYPE PEMFC, [en ligne], MEMOIRE MAGISTERE, GENIE MECANIQUE, UNIVERSITE DE BATNA, UNIVERSITE DE BATNA , 07 /07/ 2010, 84 pages, pdf.

[50]: Site web:[https://www.researchgate.net/profile/Bruno\\_Allard/publication/50427314/figure/fig2/AS:305895247499266@1449942518596/allure-theorique-typique-de-caracteristique-statique-dune-pile-a-combustible-classique.png](https://www.researchgate.net/profile/Bruno_Allard/publication/50427314/figure/fig2/AS:305895247499266@1449942518596/allure-theorique-typique-de-caracteristique-statique-dune-pile-a-combustible-classique.png) , (03 juin 2020).

[51] : Ammar DJERIOUI, Etudes des stratégies et des structures de commande pour les systèmes d'Electro-générateurs à Pile à Combustible, [en ligne], Thèse DOCTORAT, chimie, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA, UNIVERSITE M'SILA , 30/09/ 2018, 76 pages, pdf.

[52] : Site web : [https://energies.airliquide.com/sites/abt\\_ne/files/styles/1115x604/public/2017/08/08/axane-11\\_al\\_laurentlelong\\_1366.jpg?itok=ZITUt6sc](https://energies.airliquide.com/sites/abt_ne/files/styles/1115x604/public/2017/08/08/axane-11_al_laurentlelong_1366.jpg?itok=ZITUt6sc) , (04 juin 2020).

[53] : Site web : <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcS7jPAFJASed000NUoQhbsFEO1xw6UDni0HLQ2c9lrXoYIHFdbk&usqp=CAU> , (04 mai 2020).

[54] : Site web : <https://www.windpowerengineering.com/wp-content/uploads/2016/12/fuel-cell-car.jpg> , (04 juin 2020).

## Bibliographie

---

[55] : Site web : [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcQiT9DTEzj\\_JeCbwbEDu\\_cxSjqmu3J9o3PMTgPnfU-RmXqC3zka&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcQiT9DTEzj_JeCbwbEDu_cxSjqmu3J9o3PMTgPnfU-RmXqC3zka&usqp=CAU) , (05 juin 2020).

[56]:Dr. F.BOUCHAFAA, ELECTRONIQUE DE PUISSANCE, [en ligne], cours, année d'étude, ELECTRONIQUE ET INFORMATIQUE, UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENE, LABORATORY of INSTRUMENTATION, 34 pages, pdf.

[57]: Site web : <https://www.f-legrand.fr/scidoc/figures/sciphys/arduino/conversiondc/figC.png> , ( 07 juin 2020).

[58]: BOUKAROURA Abdelkader,  
Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph, [en ligne], Thèse de MGERSTER, RESEAUX ELECTRIQUES, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF, UNIVERSITE SETIF, 02/09/ 2009, 103 pages, pdf.

[59] : Site web : <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcSRWs6FFFwhgoAQbnF5IV67sVnEpk7q01cHVw&usqp=CAU> , (18 juin 2020).

[60] : HADJI Slimane, Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie photovoltaïque, [en ligne], Thèse Doctorat, Electrotechnique, Université FERHAT Abbas Sétif 1, Université Sétif 1, 10/10/2018, 160 pages, pdf.

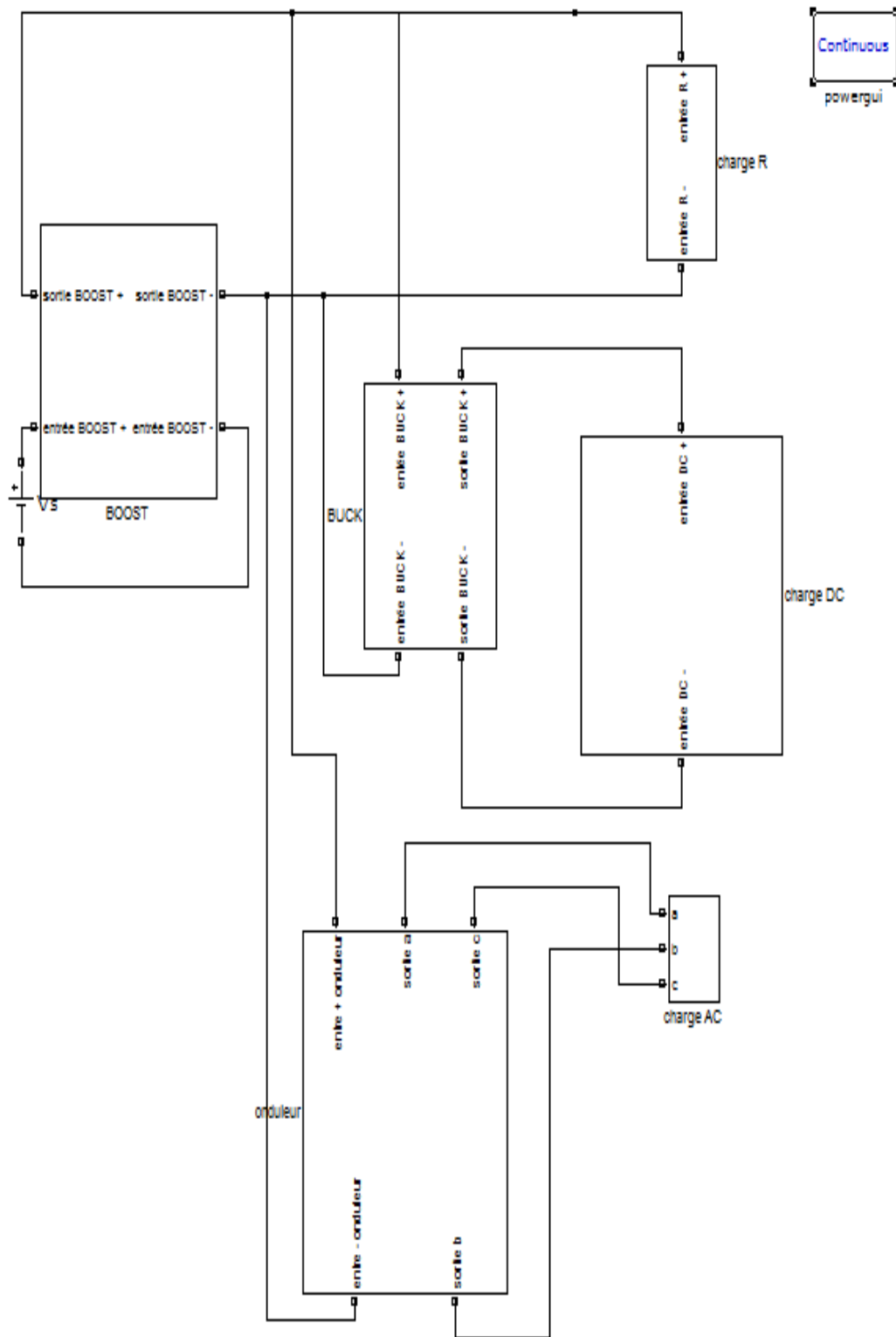
[61] : Site web:  
[https://www.researchgate.net/profile/S\\_Lalouni/publication/329360357/figure/fig2/AS:699476259921920@1543779544407/PV-System-with-MPPT-control.png](https://www.researchgate.net/profile/S_Lalouni/publication/329360357/figure/fig2/AS:699476259921920@1543779544407/PV-System-with-MPPT-control.png) , (25 juin 2020).

[62]: M.BOUKLI-HACENE Omar,  
Conseption et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion énergetique, [en ligne], Thèse de MGERSTER, AUTOMATIQUE PRODUCTIQUE INFORMATIQUE, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID\_TLEMCEN, UNIVERSITE TLEMCEN, Décembre 2011, 160 pages, pdf.

# **Annexes**

# Annexe A

## Système global avec MATLAB

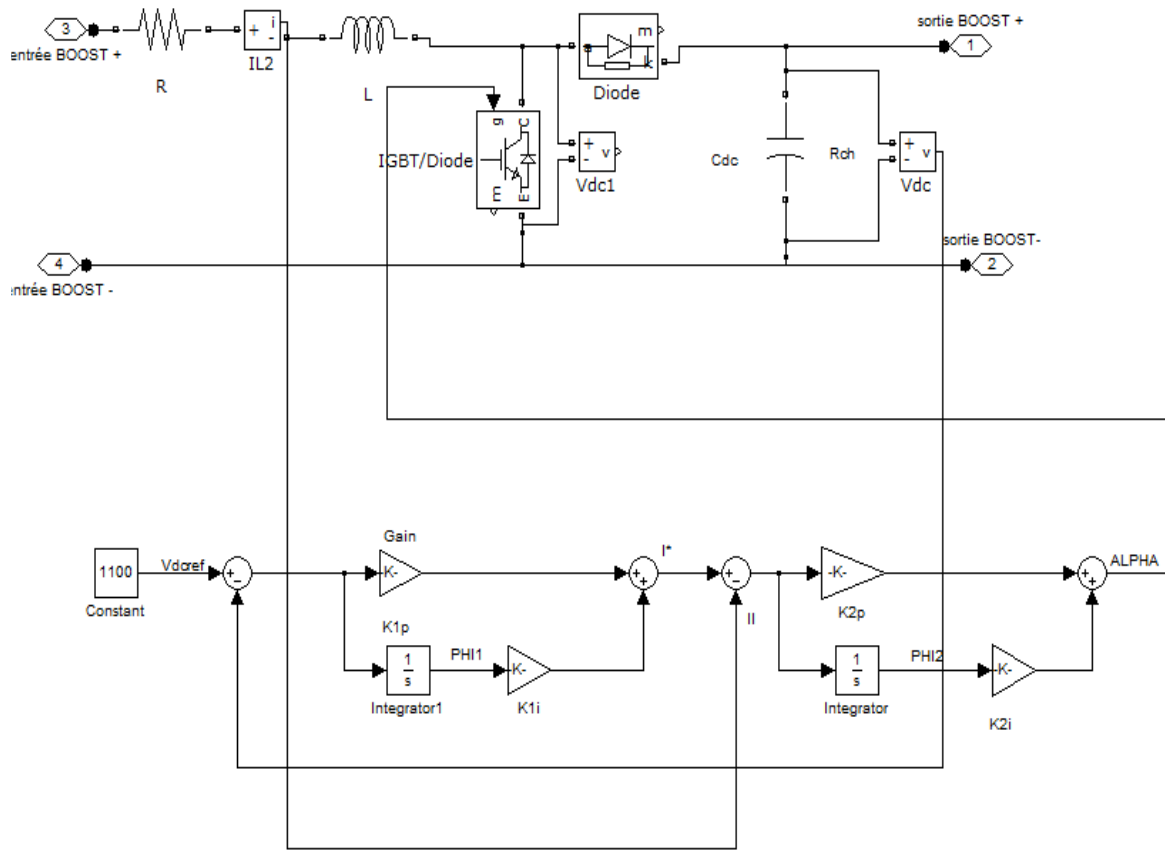


**Figure A:** Le schéma de simulation du système global du Micro-Réseau étudié avec MATLAB.



# Annexe B

## Hacheur survolteur (BOOST)



### ➤ systèmes commande :

$K_{1p}$	3.28
$K_{2p}$	0.046
$K_{1i}$	290
$K_{2i}$	283
$V_{dcref}$	1100 v

**Tableau B.1:** Paramètres du système de commande.

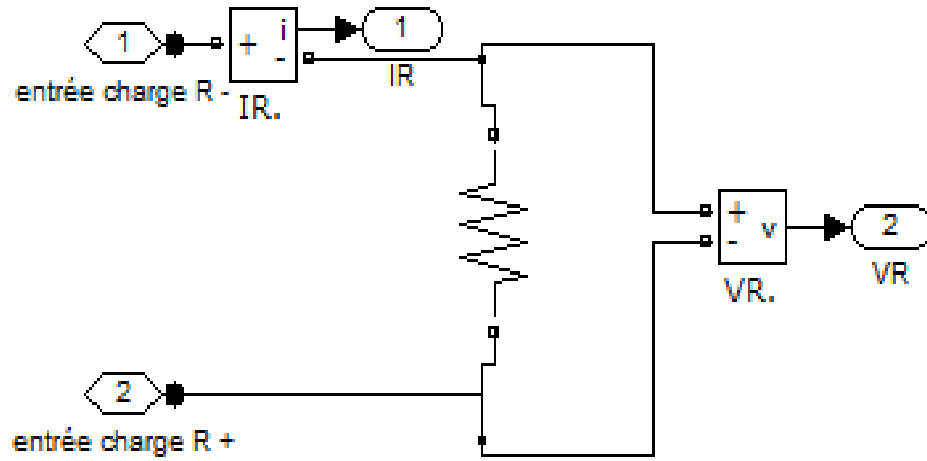
### ➤ systèmes puissance :

$V_s$	500 v
$L$	5 mH
$R$	0.1 $\Omega$
$C_{dc}$	4700 $\mu$ F

**Tableau B.2:** Paramètres du système de puissance.

# Annexe B

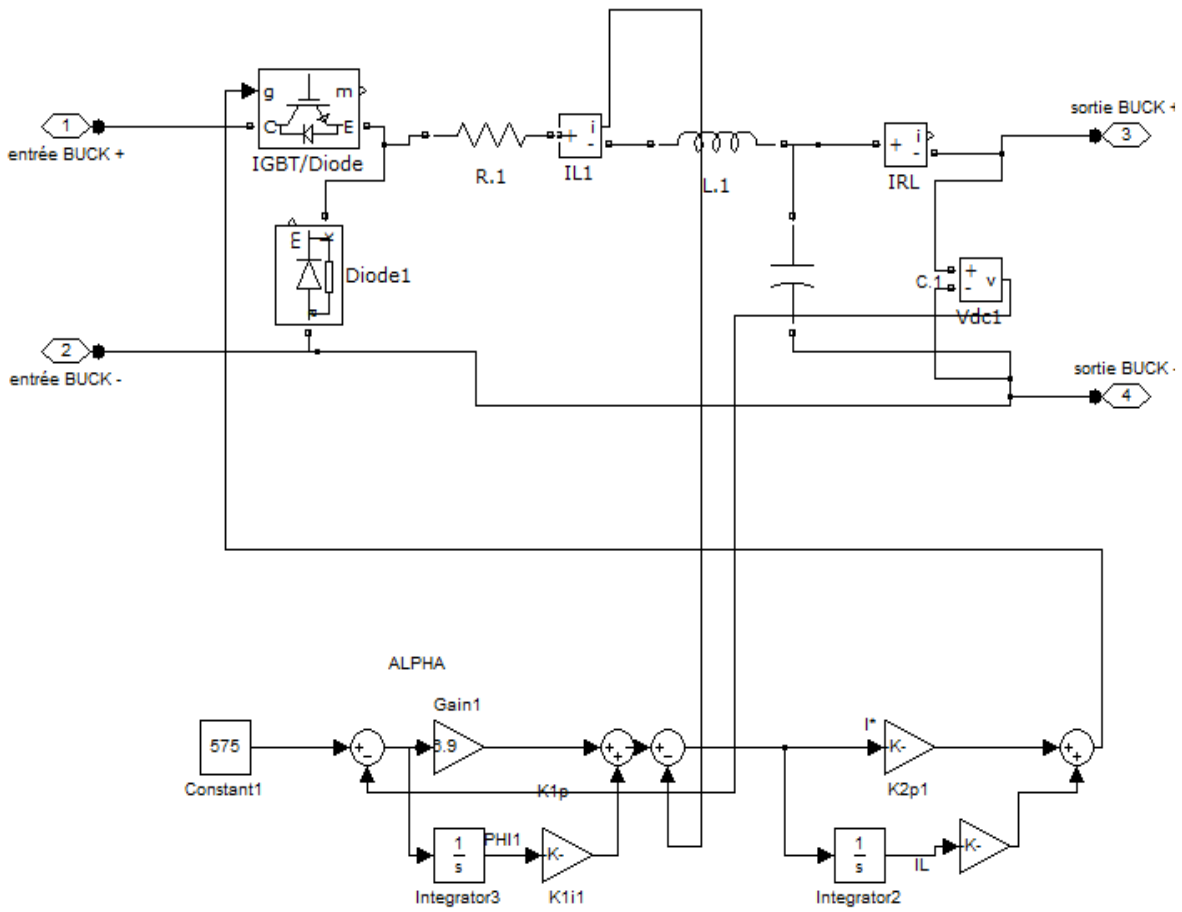
## Charge Résistive



**Figure B.2:** Le schéma de simulation d'une charge résistive avec MATLAB.

# Annexe C

## Hacheur dévolteur (BUCK)



➤ systèmes commande :

$K_{1p}$	6.9
$K_{2p}$	0.064
$K_{1i}$	696.4
$K_{2i}$	123.5
$V_{dcref}$	575 v

**Tableau C.1:** Paramètres du système de commande.

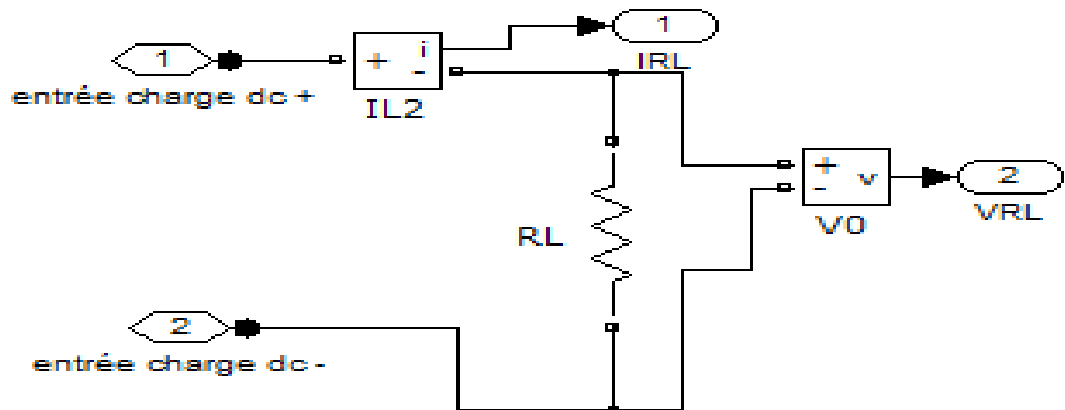
➤ systèmes puissance :

$V_s$	$V_{BOOST}$
$L_1$	3 mH
$R_1$	0.1 $\Omega$
$C_1$	1100 $\mu F$

**Tableau C.2:** Paramètres du système de puissance.

# Annexe C

## Charge DC



# Annexe D

## Onduleur Triphasé

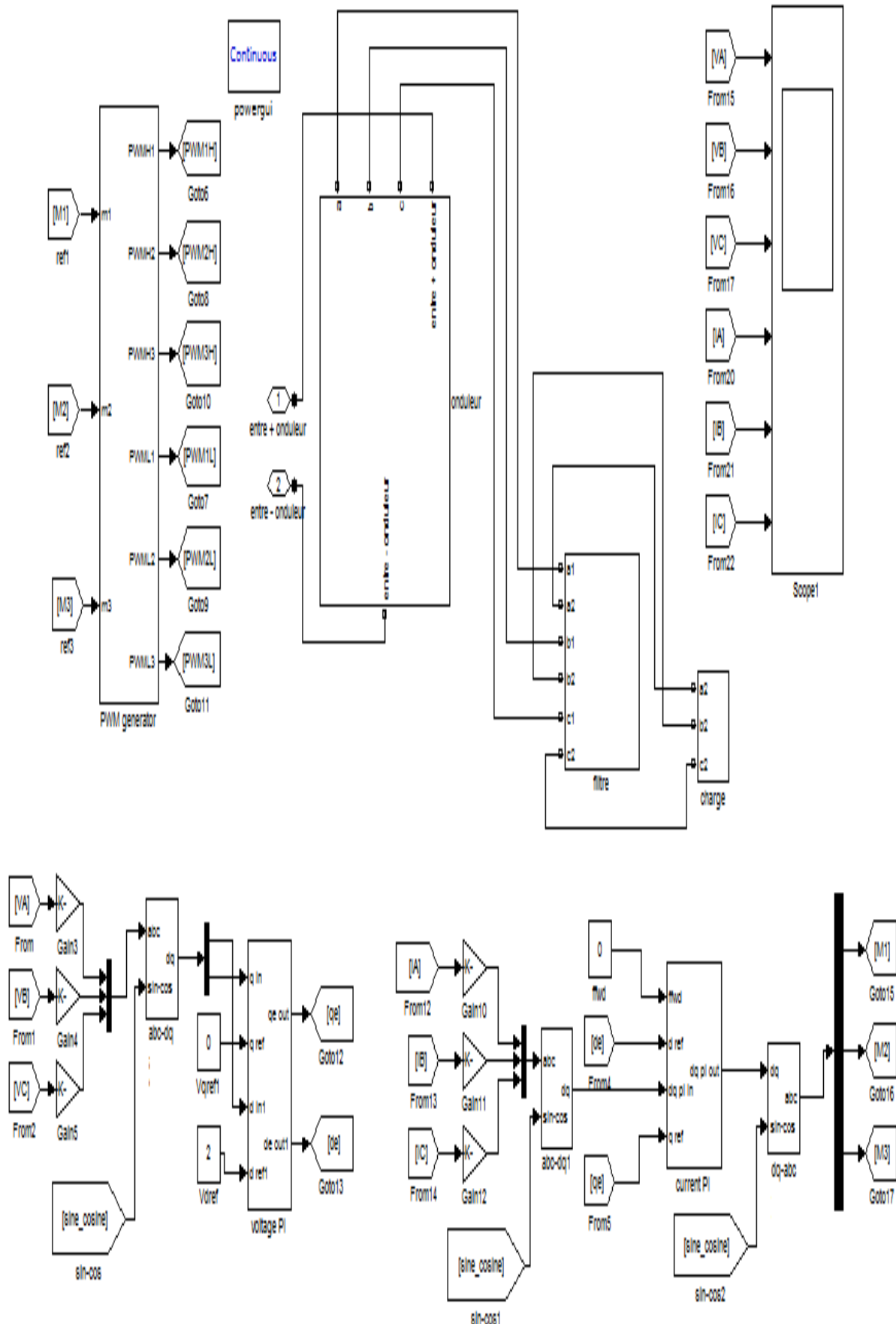


Figure D.1: Le schéma de simulation de l'Onduleur triphasé avec MATLAB.

## Annexe D

### Paramètres du système de commande et de puissance de l'Onduleur triphasé :

➤ systèmes commande :

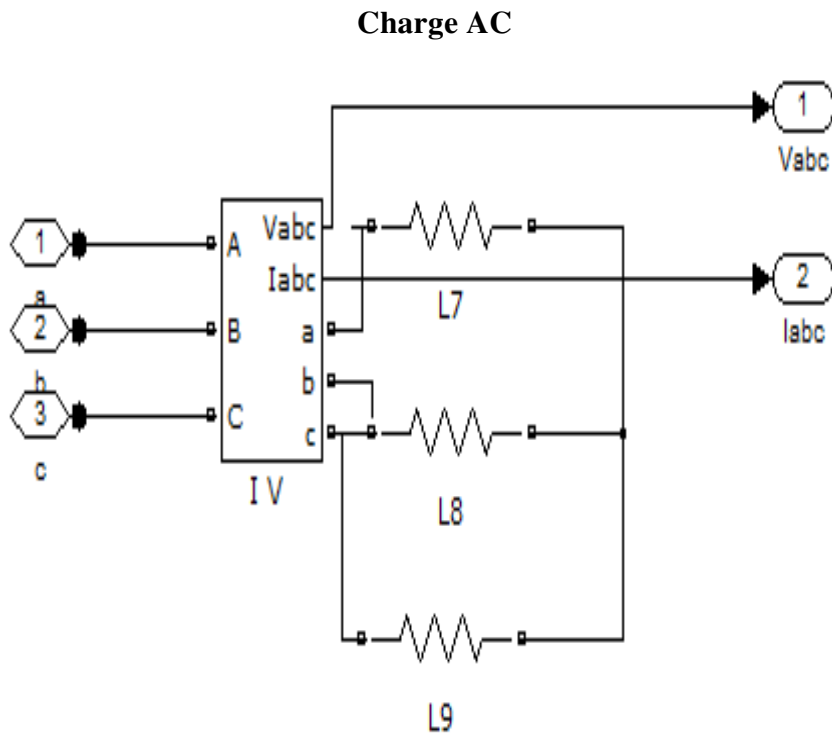
$K_{5p}$	0.055
$K_{6p}$	10.3
$K_{5i}$	0.01
$K_{6i}$	1093.7
$V_{dc\text{ref}}$	240 v

**Tableau D.1:** Paramètres du système de commande.

➤ systèmes puissance :

$V_s$	$V_{\text{BOOST}}$
$L_f$	0.6 mH
$R_f$	0.1 $\Omega$
$C_f$	50 $\mu\text{F}$

**Tableau D.2:** Paramètres du système de puissance.



**Figure D.2:** Le schéma de simulation d'une charge AC avec MATLAB.