

---

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي :  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة – أكلي محند أولحاج -البويرة  
UNIVERSITE Akli Mohand Oulhadj —Bouira  
(ALGERIE)

## **Mémoire de Master**

Présenté au département de Génie Electrique  
Faculté des Sciences et Sciences Appliquées  
Pour obtenir le diplôme

## **De Master**

En:

## **Conversion et Gestion de l'Energie**

Par :

**M. LOUNICI Nadia**  
**M. DOUAIDI Samiha**

## **Thème**

***Etude de l'intégration d'un site photovoltaïque dans un  
réseau Smart Grid.***

*Soutenu le ..... devant le jury composé de :*

M. YAHIOU Abdelghani	Maître Assistant à l'université de Bouira	<i>Président</i>
M. MOUASSA Souhil	Maître Assistant à l'université de Bouira	<i>Examineur</i>
M. MOHAMMEDI Ahmed	Maître Conférence à l'université de Bouira	<i>Examineur</i>
M. REZKI Mohamed	Maître Conférence à l'université de Bouira	<i>Eencadreur</i>
M. GRICHE Issam	Maître Assistant à l'université de Bouira	<i>Co-encadreur</i>

---

## *Dédicaces*

---

*Je dédie mon travail*

*A ma mère, à ma famille,*

*Dont le mérite, les sacrifices m'ont permis de vivre ce jour.*

*A mes amies et collègues d'étude*

*A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.*

Lounici Nadia

*Je dédie mon travail à*

*Mes parents pour leur encouragement, leur patience et leur amour ...ils sont  
l'origine de tout ce que j'ai accompli de bien,*

*A tous mes frères et mes sœurs,*

*A tous mes meilleures amies et collègues d'étude,*

*A tous ce qu'ils ont aimé me voir à ce jour là.*

Douaidi Samiha

---

## ***Remerciements***

---

*Au terme de ce travail, nous devons nos remerciements tout d'abord à dieu qui nous a donné la force et le courage de suivre nos études et d'arriver à ce stade et à nos parents qui nous ont beaucoup soutenus pendant tout au long de notre parcours.*

*Nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadreur Mr REZKI Mohamed pour nous avoir confié ce sujet, pour sa disponibilité, sa critique, son orientation, et ses précieux conseils.*

*Nous profonds remerciements vont également à Mr GRICHE Issam, Co-encadreur de projet, pour ses conseils appréciables, sa disponibilité, et ses critiques constructives.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*Enfin nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Lounici Nadia et Douaidi Samiha

---

**Sommaire**

INTRODUCTION GENERALE .....	XIII
<b>Chapitre 01</b> .....	<b>1.1</b>
GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUE .....	1.1
1.1. Introduction .....	1.1
1.2. Définition de réseau électrique .....	1.1
1.2.1. Architecture des réseaux électriques .....	1.1
1.2.2. Les différents types réseaux .....	1.1
1.2.3. Description des réseaux électriques .....	1.1
1.2.3.1. Le réseau de transport THT .....	1.1
1.2.3.2. Le réseau de répartition HT .....	1.1
1.2.3.3. Le réseau de distribution MT .....	1.1
1.3. Différents types de GED d'origine renouvelables .....	1.4
1.3.1. Solaire .....	1.1
1.3.2. Eolienne .....	1.1
1.3.3. Hydraulique .....	1.1
1.3.4. Biomasse .....	1.1
1.3.5. Géothermie .....	1.1
1.3.6. Piles à combustible .....	1.1
1.4. Définition de réseau intelligent (smart grid) .....	1.6
1.4.1. Concept d'un smart grid .....	1.1
1.4.2. Modèle générale du smart grid .....	1.1
1.4.3. Caractérisation d'un réseau électrique intelligent .....	1.1
1.4.4. Exigences de la communication pour les smart grids .....	1.1
1.4.5. Technologie d'information et de communication dans un SG .....	1.1
1.4.6. Systèmes de comptage communicant .....	1.1
1.4.6.1. Catégories de systèmes de comptage intelligent .....	1.1
1.4.6.2. Compteurs intelligents .....	1.1
1.4.7. Fonctionnalités du système de comptage intelligent .....	1.1
1.4.8. Compteurs intelligents (AMR) .....	1.1
1.4.9. Smart mètre .....	1.1

---

1.5. Comparaison entre le réseau classique et réseau smart grid.....	1.13
1.6. Conclusion.....	1.13
<b>Chapitre 02</b> .....	<b>2.14</b>
GENERALITES SUR LES PHOTOVOLTAÏQUES .....	2.14
2.1. Introduction .....	2.14
2.2. Rayonnement solaire .....	2.14
2.3. Effet photovoltaïque .....	2.15
2.4. Générateur photovoltaïque .....	2.15
2.4.1. Cellule photovoltaïque.....	2.15
2.4.2. Caractéristique énergétiques des cellules photovoltaïques.....	2.15
2.4.2.1. Rendement .....	2.15
2.4.2.2. Réponse spectrale .....	2.15
2.4.3. Différents type de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	2.15
2.4.4.1. Cellules monocristallines.....	2.15
2.4.4.2. Cellules poly cristallines.....	2.15
2.4.4.3. Cellules amorphes .....	2.15
2.4.4. Modèle de cellules solaires.....	2.15
2.5. Schéma équivalent des panneaux solaires photovoltaïques .....	2.18
2.6. Caractéristiques électriques des panneaux solaires photovoltaïques.....	2.20
2.6.1. Courbe courant-tension .....	2.20
2.6.2.1. Courbe de puissance .....	2.20
2.6.2.2. Puissance maximale.....	2.20
2.6.2.3. Facteur de forme.....	2.20
2.6.2.4. Puissance crête.....	2.20
2.7. Simulation du générateur PV.....	2.21
2.8. Structure des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau.....	2.25
2.8.1. Structure avec hacheur et onduleur .....	2.25
2.8.2. Structure des systèmes à connexion directe au réseau .....	2.25
2.9. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC .....	2.26
2.9.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	2.26
2.9.2. Résultat de Simulation par méthode « P&O » .....	2.26

---

---

2.10. Conclusion.....	2.31
<b>Chapitre 03</b> .....	<b>3.1</b>
INTEGRATION DE PHOTOVOLTAÏQUE AU RESEAU ELECTRIQUE .....	3.1
3.1. Introduction .....	3.1
3.2. Modèle simplifié d'un générateur synchrone.....	3.1
3.3. Modélisation de l'Etat- stable de la machine synchrone (aspects analytiques) .....	3.2
3.4. Modèle des régulateurs.....	3.5
3.5. Modèle de Turbine .....	3.7
3.6. Modèle de réseau électrique .....	3.8
3.7. Modèle de la charge.....	3.11
3.8. Stabilisateur de système de puissance (PSS).....	3.13
3.9. Intégration de photovoltaïque avec une charge .....	3.16
3.9.1. Présentation du système .....	3.16
3.9.2. Interprétation des résultats .....	3.16
3.10. Intégration de photovoltaïque avec une machine synchrone.....	3.19
3.10.1. Présentation du système .....	3.19
3.10.2. Interprétation des résultats.....	3.19
3.11. Conclusion.....	3.22
<b>Chapitre 04</b> .....	<b>4.1</b>
APPLICATION SUR UN MICRO-RESEAU .....	4.1
4.1. Introduction .....	4.1
4.2. Description du réseau .....	4.1
4.3. Simulation.....	4.1
4.3.1. Schéma de simulink.....	4.1
4.3.2. Les résultats .....	4.1
4.3.3. Interprétation des résultats.....	4.1
4.4. Conclusion.....	4.14
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES .....	P.C.1

---



## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Architecture de réseau électrique avec diverses sources de production .....	1.2
<b>Figure 1.2.</b> Schéma d'un réseau électrique.....	1.3
<b>Figure 1.3.</b> Schéma général de la production, du transport et de la distribution d'énergie [2] .....	1.4
<b>Figure 1.4.</b> Modèle général du Smart grid.....	1.8
<b>Figure 2.1.</b> Structure d'une cellule photovoltaïque. ....	2.16
<b>Figure 2.2.</b> Circuits équivalents de cellules :(a)modèle simple-diode ;(b) modèle double-diode ..	2.18
<b>Figure 2.3.</b> Schéma du modèle à deux exponentielles d'une photovoltaïque .....	2.19
<b>Figure 2.4.</b> Caractéristique courant-tension d'un panneau solaire photovoltaïque .....	2.20
<b>Figure 2.5.</b> Caractéristique puissance-tension d'un panneau solaire photovoltaïque.....	2.21
<b>Figure 2.6.</b> Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque .....	2.22
<b>Figure 2.7.</b> Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.....	2.22
<b>Figure 2.8.</b> Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension, pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$ .....	2.23
<b>Figure 2.9.</b> Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension, pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$ .....	2.24
<b>Figure 2.10.</b> Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairement et une température $T=25^\circ\text{C}$ . ....	2.24
<b>Figure 2.11.</b> Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé .....	2.25
<b>Figure 2.12.</b> Différentes topologies des installations PV connectés aux réseaux électriques. ....	2.26
<b>Figure 2.13.</b> Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT .....	2.27
<b>Figure 2.14.</b> Schéma Algorithmique de la méthode MPPT « perturbation-observation » (p&o) .....	2.28
<b>Figure 2.15.</b> Schéma de simulink P&O sous Matlab .....	2.29
<b>Figure 2.16.</b> Résultats de simulation des courbes $I(v)$ et $P(v)$ générée par le générateur photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ par méthode P&O. ....	2.29
<b>Figure 2.17.</b> Résultats de simulation de la tension et courant générée par le générateur photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ par méthode P&O. ....	2.30
<b>Figure 2.18.</b> Résultats de simulation de la puissance'MPPT' générée par le générateur photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ par méthode P&O .....	2.30

<b>Figure 2.19.</b> Résultats de simulation de la tension et courant de sortie du système global pour $G=1000W/m^2$ $T=25^\circ C$ par méthode P&O.....	2.30
<b>Figure 2.20.</b> Résultats de simulation de la puissance de sortie du système global pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$ par méthode P&O.....	2.31
<b>Figure 3.1.</b> Représentation classique du générateur synchrone .....	3.2
<b>Figure 3.2.</b> Modèle de l'état statique de la machine synchrone .....	3.4
<b>Figure 3.3.</b> Block diagramme de représentation de la vitesse du régulateur.....	3.5
<b>Figure 3.4.</b> La réponse de régulateur de vitesse .....	3.7
<b>Figure 3.5.</b> Diagramme d'une turbine à vapeur.....	3.7
<b>Figure 3.6.</b> Schéma block de régulateur de la turbine .....	3.8
<b>Figure 3.7.</b> Modèle déduit de la turbine avec le régulateur .....	3.8
<b>Figure 3.8.</b> Modèle déduit de la turbine avec le régulateur .....	3.9
<b>Figure 3.9.</b> PSS avec l'entrée de vitesse.....	3.14
<b>Figure 3.10.</b> Modèle pratique d'un PSS .....	3.16
<b>Figure 3.11.</b> Schéma d'intégration de PV avec une charge .....	3.16
<b>Figure 3.12.</b> Bloc de simulation .....	3.17
<b>Figure 3.13.</b> (a) :puissance de la charge,(b) :alimentation de l'onduleur,(c) :courant de charge,(d) :tension de charge,(e) :tension aux bornes de l'hacheur,(f) :puissance fournie par la PV.....	<b>Err</b>
<b>eur ! Signet non défini.</b>	
<b>Figure 3.14.</b> Schéma d'intégration de PV avec une machine synchrone .....	3.19
<b>Figure 3.15.</b> Bloc de simulation .....	3.19
<b>Figure 3.16.</b> Modèle de la région (Machine).....	3.20
<b>Figure.3.17.</b> (a) :vitesses des deux machines synchrones,(b) :alimentation de l'onduleur,(c) :tensions terminales aux bornes des deuxx machines,(d) :puissance fournie par le PV,(e) :puissance des deux machines synchrones,(f) :tension aux bornes de l'hacheur .....	3.21
<b>Figure .4.1.</b> Système de test .....	4.2
<b>Figure .4.2</b> maison (05)puissance des cinq Bilan de .....	4.3
<b>Figure 4.3</b> industries (04)Bilan de puissance des quatre .....	4.3
<b>Figure. 4.4</b> industrie de puissance de grande Bilan .....	4.4
<b>Figure. 4.5</b> Block de simulation .....	4.5
<b>Figure .4.6(a)</b> La tension, <b>(b)</b> le courant, <b>(c)</b> la puissance de source pour 24 hures.....	4.6
<b>Figure .4.7(a)</b> La tension, <b>(b)</b> le courant, <b>(c)</b> la puissance d'industries pour 24 heures.....	4.7

<b>Figure .4.8(a)</b> La tension, <b>(b)</b> le courant, <b>(c)</b> la puissance de industrie lourde pour 24 heures .....	4.8
<b>Figure .4.9(a)</b> La tension, <b>(b)</b> le courant, <b>(c)</b> la puissance des maisons pour 24 heures.....	4.9
<b>Figure .4.10(a)</b> La tension, <b>(b)</b> le courant, <b>(c)</b> la puissance de source pour 12 hures .....	4.10
<b>Figure .4.11(a)</b> La tension, <b>(b)</b> le courant, <b>(c)</b> la puissance d'industries pour 12 heures.....	4.11
<b>Figure .4.12(a)</b> La tension, <b>(b)</b> le courant, <b>(c)</b> la puissance de industrie lourde pour 12 heures...	4.12
<b>Figure .4.13 (a)</b> La tension, <b>(b)</b> le courant, <b>(c)</b> la puissance des maisons pour 12 heures .....	4.13

---

## *Liste des tableaux*

---

---

<b>Tableau 1</b> Comparaison entre réseau classique et réseaux	1.13
<b>Tableau 41</b> Bilan de puissance de la maison	4.2

## *Listes des Acronymes et Symboles*

---

---

**GED** : génératrice de l'énergie décentralisée

**SG** : smart grid

**TIC** : Technologies de l'information et de la communication

**HT** : Haute Tension

**HTB** : Haute Tension B

**HTA** : Haute Tension A

**MT** : Moyenne Tension

**AMR** : Automated Meter Reading

**AMM**: Automated Meter Management

**PV**: Photovoltaïque

**P&O**: Méthode de perturbation et d'observation

# INTRODUCTION GENERALE

---

---

Aujourd'hui, grâce à l'évolution du réseau actuel dans le but de satisfaire à la demande croissante d'électricité surtout dans les périodes de pointes qui poseront des problèmes néfastes, et pour répondre à ce besoin, les réseaux électriques doivent devenir plus communicants. Ils bénéficient pour cela des Nouvelles Technologies d'Information et de Communication. Le réseau électrique intelligent ou Smart Grid est l'un des développements récents dans le domaine des systèmes électriques qui facilite l'utilisation de nouvelles sources d'énergie en parallèle avec les sources d'énergie conventionnelles.

Le Smart Grid révolutionne l'infrastructure actuelle du réseau électrique par l'intégration de technologies de l'information et de la communication, qui permettra aux fournisseurs et aux clients de transférer, surveiller, prévoir et gérer efficacement la consommation d'énergie. L'intégration des énergies renouvelables au réseau électrique pose des défis techniques. L'intermittence des ressources peut avoir un impact sur la stabilité et la fiabilité du système d'alimentation, ainsi que sur la qualité de service des utilisateurs. Par conséquent, la surveillance et le contrôle des Smart Grids sont essentiels pour garantir un bon fonctionnement. [1]

Dans ce projet, nous sommes intéressés au contrôle et à la surveillance du réseau électrique intelligent pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelables.

Le mémoire est structuré sur quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les réseaux électriques et les réseaux smart Grid.

Le deuxième chapitre présente les différents éléments de système photovoltaïque et leur principe de fonctionnement ainsi que l'étude de l'influence de température et d'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, après l'optimisation de la puissance maximale.

Le troisième chapitre présente la modélisation et la présentation du modèle de réseau électrique qui se compose d'éléments (machine synchrone, transformateurs, lignes,...), et le générateur, régulateur, la turbine, ...et la fonction de base d'un PSS stabilisateur de système de puissance. On a fait une simulation avec une connexion direct entre le générateur photovoltaïque et la charge (triphasee, monophasée).

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons une simulation complète sur un système smart grid avec le contrôle de la consommation des clientes.

Terminerons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

# Chapitre 01

## GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUE

### 1.1. Introduction

La fonction principale d'un réseau électrique est la liaison des différents centres de consommation aux centrales de production tout en satisfaisant la demande en énergie électrique et en assurant la continuité de la fourniture d'énergie demandée.

Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter, les réseaux électriques ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Cette complexité de structure pose des problèmes néfastes sur les consommateurs ainsi sur le coût de la production.

L'apparition des défauts dans un réseau d'énergie électrique et l'augmentation de la consommation des énergies entraîne une nouvelle technologie qui s'appelle réseau intelligent (smart grid) pour garantir que la quantité d'énergie disponible sur le réseau soit en permanence égale à celle consommée.

Dans ce chapitre se concentre sur les généralités des réseaux électriques et Smart grid, des exigences de la communication introduite par l'information et la communication.

### 1.2. Définition de réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs en passant par des lignes électriques et des transformateurs. Il est défini par le type de courant électrique qu'il utilise, la valeur de tension et la fréquence. [2]

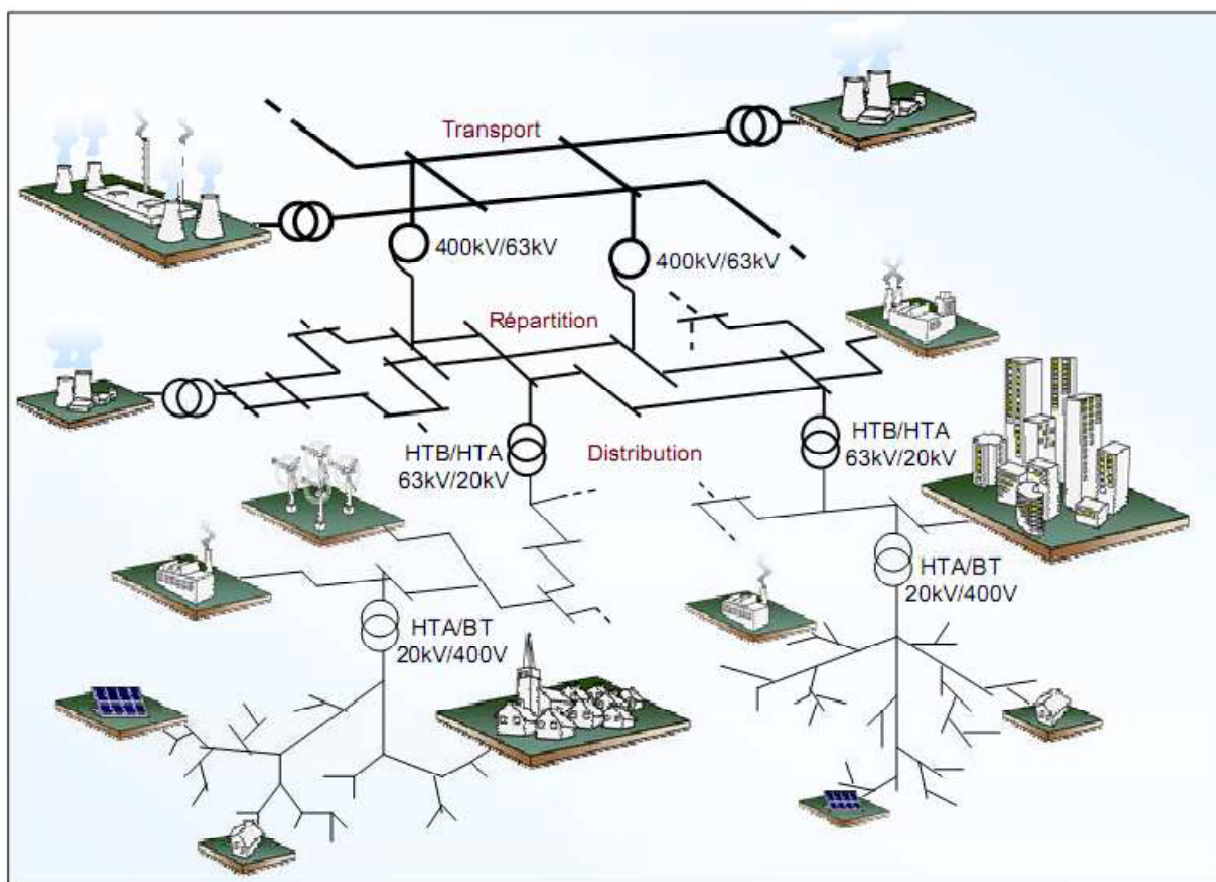
#### 1.2.1. Architecture des réseaux électriques

La conception et l'utilisation de chaque architecture du réseau électrique permettent d'atteindre plus ou moins une grande disponibilité de l'énergie électrique. Le coût économique du réseau dépend naturellement de sa complexité. Le choix d'une architecture de réseau est donc un compromis entre des critères techniques et économiques.

En fonction de la densité et de la nature des unités de production, un réseau aura une architecture semblable à celle de la figure 1.1.

Nous pouvons noter que les unités de production peuvent être raccordées aux différents étages selon

la puissance mise en jeu. Les transformateurs jouent un rôle très important pour passer d'un niveau de tension à un autre donc pour passer d'un type de réseau à un autre. [3]



**Figure 1.1.** Architecture de réseau électrique avec diverses sources de production [3]

### 1.2.2. Les différents types des réseaux électriques

Le réseau électrique se compose de l'ensemble des câbles électriques connectés entre eux. Il existe différents types de réseaux :

- Le réseau HT (Haute Tension) qui est utilisé pour le transport et la répartition de l'électricité. Il se décompose en deux sous réseaux :
  - Le réseau HTB (Haute Tension B) qui sert à l'alimentation générale du niveau national (réseau 400 kV) au niveau régional (réseau 63 kV ou 90 kV) ;
  - Le réseau HTA (Haute Tension A) qui est le réseau de distribution local en moyenne tension (rayon de 10 à 20 km autour d'un poste source) ;
- Le réseau BT (basse tension) (tension inférieure à 1000 V) qui sert à la distribution électrique dans les quartiers ou communes (rayon d'environ 500 m autour des postes de distribution).

Les câbles reliant les utilisateurs aux postes d'alimentation sont de types divers. En effet, il existe plusieurs sections de câbles. De plus, les câbles sont soit en aluminium, soit en cuivre et ils sont soit aériens (sur des « poteaux »), soit souterrains. [4]

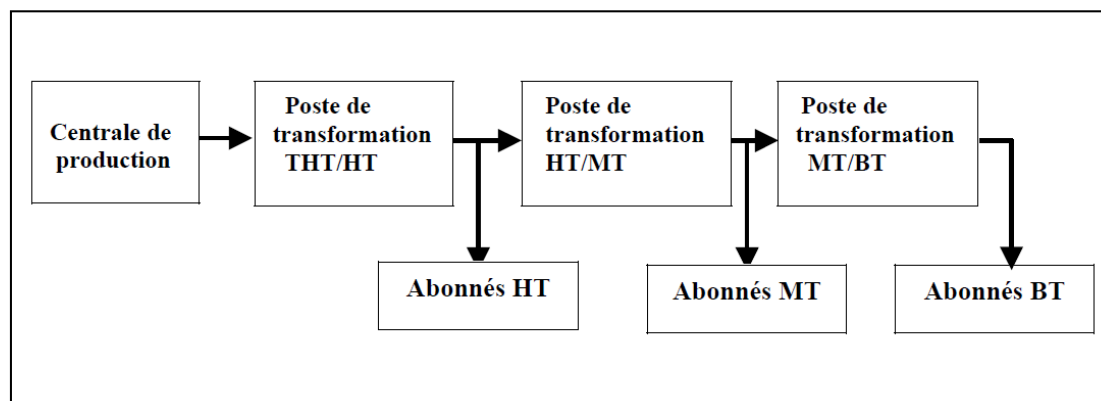


Figure 1.2. Schéma d'un réseau électrique [5]

### 1.2.3. Description des réseaux électriques

#### 1.2.3.1. Le réseau de transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. Le réseau THT branche les centrales de grandes puissances (> 300 MW) qui sont la plupart aériens et souterrains dans les villes ou à leur approches. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant en général à la limite thermique de la ligne.

#### 1.2.3.2. Le réseau de répartition HT

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT .la structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains).

#### 1.2.3.3. Le réseau de distribution MT

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie,

provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport.

Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition et alimentent Des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir ; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements.[5]

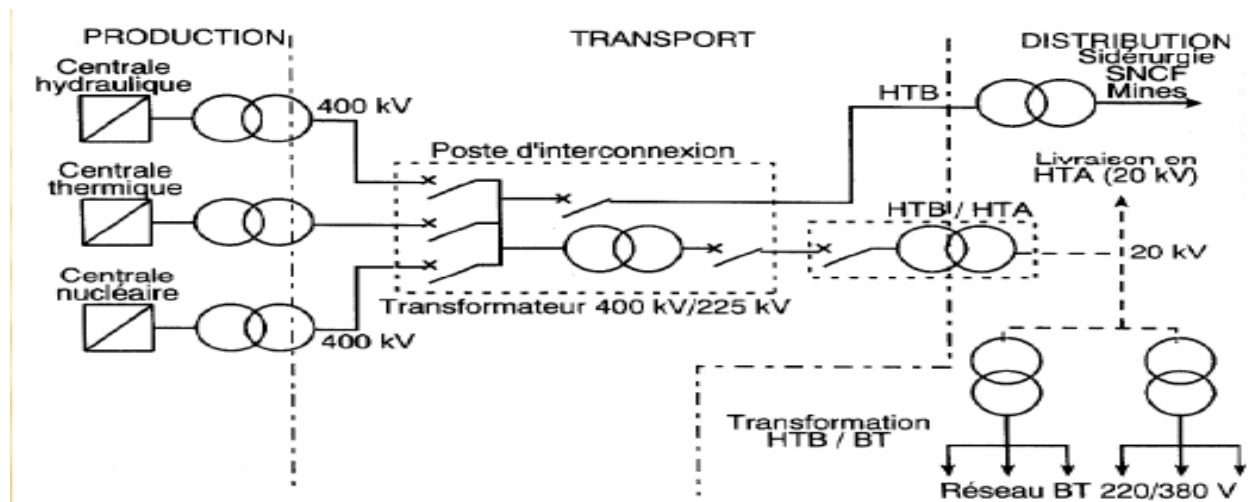


Figure 1.3. Schéma général de la production, du transport et de la distribution d'énergie [6]

## 1.3. Différents types de GED d'origine renouvelables

### 1.3.1. Solaire

Bien qu'elle ne soit pas l'énergie renouvelable représentant la puissance installée la plus importante, l'énergie solaire est de loin l'énergie renouvelable qui compte le plus d'installations. Dans la très grande majorité des cas, l'énergie solaire est convertie en électricité à l'aide d'installation Photovoltaïque (PV) qui permet de transformer le rayonnement solaire en courant continu. L'autre solution, beaucoup plus rare et généralement pour des installations de puissances importantes, consiste à concentrer les rayonnements solaires pour produire de la chaleur qui est ensuite convertie en électricité. Le PV a l'avantage de présenter un coût d'installation modéré (face aux autres types de GED) grâce à un faible taux d'équipement et une implantation sur site peu contraignante. Les PV sont les GED les plus présentes sur le réseau de distribution, la majorité des installations ne dépassent pas quelques kilo Watt. [7]

### 1.3.2. Éolienne

Les éoliennes injectent de l'énergie sur le réseau électrique en convertissant, successivement, l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. Bien que les investissements soient importants, l'énergie éolienne connaît une forte croissance ces dernières années. En effet, les technologies à maturité et les puissances de production toujours plus importantes, couplées à des subventions gouvernementales et à des prix de rachat du kilowatt intéressants permettent au secteur d'attirer les investisseurs. Les éoliennes connectées sur le réseau de distribution sont principalement raccordées en HTA. Il existe néanmoins des installations de faible puissance connectées sur le réseau BT, appelées micro éoliennes. Bien que les sociétés commercialisant des micro-éoliennes soient de plus en plus nombreuses, ces installations restent pour le moment relativement marginales. Le micro-éolien urbain, se déclinant sous de nombreuses formes (toit de bâtiment, tête de réverbère, bordure de route, etc.) trouve pour le moment difficilement sa place. Les installations éoliennes sont connectées au réseau HTA pour des puissances comprises entre 12 MW et 36 kW, les parcs excédant 12 MW sont raccordés au réseau de transport. Les micros éoliennes de puissance inférieure à 36 kW peuvent être connectées en BT. [7]

### 1.3.3. Hydraulique

Les installations hydrauliques utilisent l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau. Ce sont le débit et la hauteur de la chute d'eau qui dimensionnent la puissance de l'installation. Les centrales hydroélectriques peuvent être dites « au fil de l'eau », elles privilégient alors le débit à la hauteur, ou au contraire, de type « chute d'eau » où la puissance sera d'avantage issue de la hauteur. La puissance des installations hydroélectriques varie fortement, pouvant aller de 22 GW, pour le barrage des trois gorges en Chine, à quelques kilowatts. Les installations assimilables à des GED sont appelées microcentrales hydrauliques. L'ordre de grandeur de leur puissance est de 5 MW. [7]

### 1.3.4. Biomasse

La production d'énergie électrique à partir des centrales thermiques à biomasse consiste à utiliser des combustibles d'origine organique renouvelables afin de produire de la chaleur pour entraîner une turbine. Bien que quelques petites installations soient présentes sur le réseau de distribution, les centrales à biomasse sont assez rarement considérées comme étant des GED puisqu'elles présentent majoritairement des puissances nominales supérieures à 12 MW et sont donc connectées sur le réseau de transport. [7]

### **1.3.5. Géothermie**

La géothermie consiste à utiliser la chaleur des nappes d'eau souterraine pour entraîner une turbine. Fréquemment exploitée en cogénération chauffage / électricité, elle permet d'alimenter un réseau d'eau chaude et de produire de l'électricité. La géothermie reste un moyen de production d'électricité marginal en algérie. En revanche, elle est beaucoup plus exploitée dans les pays à fort potentiel géothermique. [7]

### **1.3.6. Piles à combustible**

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer l'énergie chimique d'un gaz ou d'un liquide combustible en énergie électrique. Le combustible utilisé dans la plupart des piles à combustible est l'hydrogène. Le méthanol peut aussi être utilisé directement dans certaines piles à combustible. Dans les piles à hydrogène, la conversion d'énergie chimique en énergie électrique, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, est réalisée par une réaction chimique de oxydation/réduction. [7]

## **1.4. Définition de réseau intelligent (smart grid)**

Un réseau électrique intelligent est un réseau qui est capable d'intégrer au meilleur coût les comportements et les actions de tous les utilisateurs qui y sont reliés : producteurs, consommateurs ainsi que ceux qui sont les deux à la fois. L'objectif est d'assurer au système électrique d'être durable et rentable, avec des pertes faibles et avec des niveaux élevés de sécurité, de fiabilité et de qualité de la fourniture. De façon plus précise, un réseau électrique intelligent (Smart Grid) a pour objectif de générer et distribuer de l'énergie de façon plus efficace, plus économique et plus durable qu'un réseau classique, tout en assurant la sécurité de l'approvisionnement.

Il intègre et interconnecte à cette fin des technologies (produits et services) et outils innovants sur l'ensemble de sa chaîne de valeur, depuis la production d'énergie jusqu'aux équipements du consommateur [4]. Cette intégration est réalisée grâce à l'utilisation de capteurs et d'équipements numériques de protection, de mesure et de communication, en interface avec les centres de contrôle et de pilotage.

Le réseau électrique intelligent offre à tous les consommateurs la possibilité d'obtenir des informations précises sur leurs usages électriques. Cela leur permet de mieux connaître et piloter leur propre consommation, leur éventuelle autoproduction et d'améliorer leur efficacité énergétique, en liaison avec le réseau et ses opérateurs. [4]

### 1.4.1. Concept d'un Smart grid

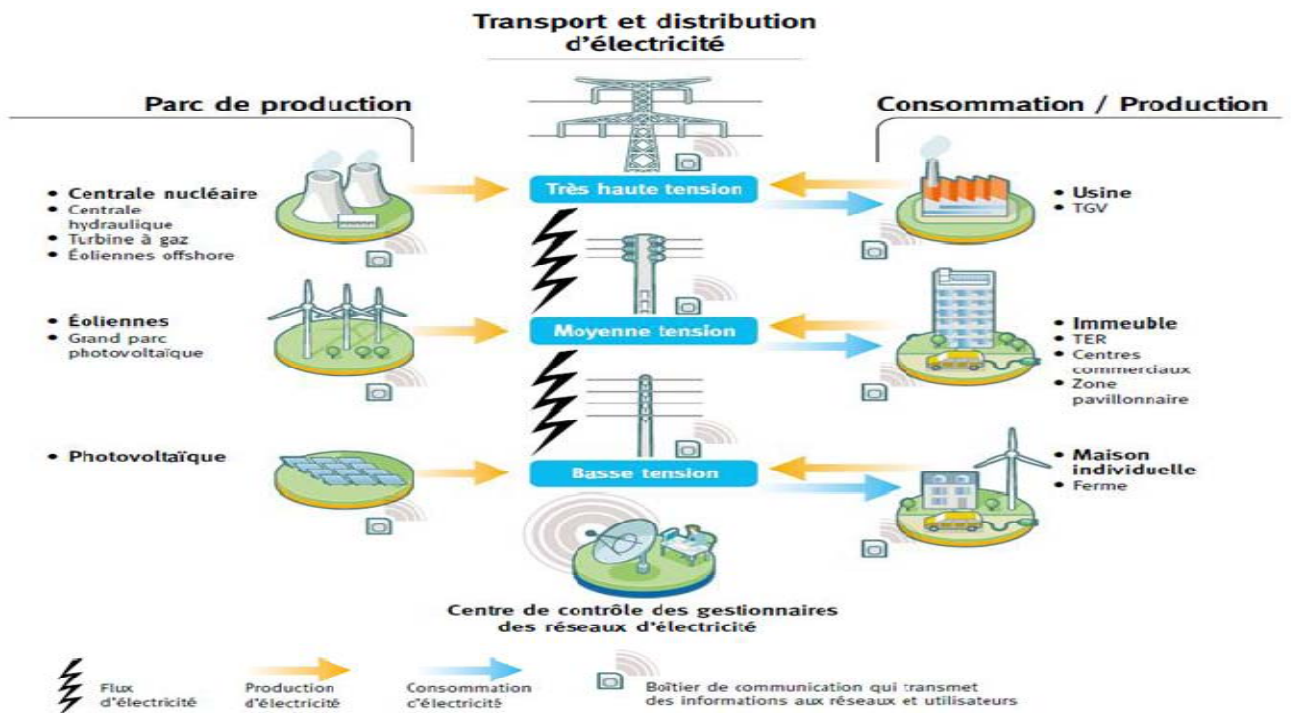
Le terme Smart Grid a été inventé par Andres E. Carvalloen 24Avril 2007 à une Conférence de l'énergie à Chicago, où il a présenté le SG comme une combinaison de l'énergie, les communications, les logiciels et les matériels de protection automatisé. La définition d'un SG est l'intégration d'un réseau électrique, un réseau de communication, des logiciels et du matériel afin de surveiller, contrôler et gérer la production, la distribution, le stockage et la consommation d'énergie. Les SG sont la base pour le développement de la transmission des informations électriques, des réseaux de distribution fortement flexible, des réseaux fiables et des systèmes durables. Les structures optimales d'un SG doivent être développées pour des principaux concepts en tenant compte de :

- Intégration des sources d'énergie renouvelables,
- Application des technologies novatrices, par exemple dispositifs de stockage d'énergie, électronique de puissance, les véhicules électriques (VE)...etc,
- Utilisation des technologies de la communication pour améliorer l'observabilité et la contrôlabilité des réseaux,
- Développement de l'application intelligente pour les systèmes de protection avec des concepts d'automatisation,
- Haute sécurité de production d'énergie et des différentes informations liées au SG,

Conception de nouvelles structures du réseau, par exemple "micro smart grid", réseaux DC, les réseaux de transmission avec stockage [8].

### 1.4.2. Modèle générale du Smart grid

Les Smart grids témoigneront la migration d'un réseau électrique à flux unidirectionnel d'électricité vers un réseau électrique à flux bidirectionnel d'électricité et d'informations. La figure 3 représente un modèle général du Smart grid. Elle montre l'intégration des énergies renouvelables comme les éoliennes et les photovoltaïques aux réseaux de transmission moyenne tension et de distribution basse tension.



**Figure 1.4.** Modèle général du Smart grid [6]

En addition aux grandes plantes de production, les consommateurs entrent en jeu tels que les grandes usines, les centres commerciaux, les maisons, les véhicules électriques, etc. Ces consommateurs peuvent devenir à leur tour des producteurs d'énergie s'ils possèdent des générateurs propres à eux. En plus du flux bidirectionnel d'électricité, il existe un flux d'informations assurant une gestion plus efficace de l'énergie. Grâce aux nouvelles technologies de l'information, les gestionnaires de réseaux détecteront et localiseront facilement les pannes sur le réseau. Ils effectueront les opérations de maintenance, de relève et de conduite à distance. Les centres de contrôle des gestionnaires des réseaux d'électricité seront également informés en temps réel des besoins en énergie des consommateurs : ils distribueront alors la juste quantité d'électricité sur le réseau. Le fonctionnement du Smart grid est donc basé sur la possibilité d'interaction entre plusieurs entités via les réseaux de communication. Une infrastructure de communication à la fois extensible et envahissante représente un problème essentiel dans le fonctionnement des réseaux intelligents. [6]

### 1.4.3. Caractérisation d'un réseau électrique intelligent

Le réseau électrique intelligent constitue un écosystème complexe que l'on peut décrire sous forme d'une combinaison de systèmes afin de saisir les éléments les plus structurants de cette « nouvelle Économie de l'électricité » ou « nouvelle économie de l'énergie » au sens large.

L'écosystème des Réseaux électriques intelligents modifie le système actuel des réseaux qui repose sur une gestion Unidirectionnelle (de l'amont vers l'aval) en introduisant une gestion systématique intégrée à plusieurs Niveaux et bidirectionnelle (de la production centralisée aux productions décentralisées). [4]

#### **1.4.4. Exigences de la communication pour les Smart grids**

La conception d'un système de communication fiable, résilient, facile à gérer et sécurisé représente un élément clé dans la conception des Smart grids .Cette infrastructure de communication constituera la plateforme reliant les éléments du réseau, les fournisseurs de données et les entités de prise de décision. Compte tenu de ces besoins, la norme IEC 61850 définit les exigences du système de communication assurant le succès de la conception des réseaux intelligents :

- **Flexibilité**, pour adapter et croître la topologie du système selon les exigences changeantes.
- **Performance**, en particulier la qualité de service, afin de permettre la priorisation efficace entre les applications concurrentes et pour répondre aux besoins critiques tels que les fonctions de protection et de contrôle.
- **Fiabilité**, pour les systèmes critiques de protection, mais aussi parce que de nombreux systèmes différents se fondent sur la même infrastructure [6].

#### **1.4.5. Technologie d'information et de communication dans un SG**

Dans le SG, les informations cohérentes sont le facteur clé pour la livraison fiable de l'énergie électrique à partir de l'unité de génération jusqu'aux utilisateurs finaux. L'absence d'analyses automatisées, mauvaise visibilité, réponse lente des interrupteurs mécaniques et le manque de connaissances de la situation, étaient les quelques inconvénients du réseau classique. Avec l'incorporation de technologies modernes, l'architecture du réseau intelligent augmente la stabilité et la flexibilité du réseau électrique en introduisant une détection et une commande rapide à travers les protocoles et les topologies de communication avancés [6].

#### **1.4.6. Systèmes de comptage communicant**

Les compteurs communicants sont une des composantes du déploiement des réseaux électriques Intelligents. Ils sont une première étape vers le déploiement de futurs systèmes de

comptage intelligent. Les nouveaux produits proposés sont de plus en plus complexes ; ils gèrent les fonctions classiques de mesure de l'énergie consommée et de tarification variable (a minima le tarif Heures Pleines / Heures Creuses, mais à terme des tarifications beaucoup plus flexibles et dynamiques).

Ces compteurs sont capables de mesurer l'énergie produite (mesure de flux bidirectionnels), de gérer la puissance qui transite et de piloter la courbe de charge. Ils disposent enfin de capacités de communication bidirectionnelle qui permettent de faire de la relève à distance et qui les rendent pilotables à distance. Ils donnent donc, enfin, la possibilité au consommateur d'avoir facilement une meilleure appréhension de ses consommations.

Pour être effectivement utiles, les données de comptage devront être intégrées dans les centres de pilotage du réseau et traitées par les outils informatiques appropriés. Cela permettra la modélisation Fine du pilotage de la charge ainsi que l'anticipation de la production d'énergie et du stockage décentralisés. [4]

#### 1.4.6.1. Catégories de systèmes de comptage intelligent

- Système AMR (Automated Meter Reading) : il est apparu dans les années 90 surtout aux Etats Unis ; il est basé sur des compteurs communicant généralement de manière mono directionnelle avec le système central pour apporter des fonctionnalités de télé relève, mais également, pour l'électricité, de tarification multi-horaire (Time of Use), de détection de panne et de fraude.
- Système AMM (Automated Meter Management) : il est apparu dans les années 90 en Europe puis dans les années 2000 aux Etats Unis ; il est basé sur des compteurs communicant toujours de manière bidirectionnelle avec le système central pour apporter des fonctionnalités complémentaires de gestion des compteurs (modification des tarifs, de la puissance souscrite, coupure et mise en service), de gestion de la charge et d'information du consommateur. [9]

#### 1.4.6.2. Compteurs intelligents

Les développeurs des offres de compteurs communicants et des systèmes répondant aux besoins de tous les acteurs amenés à intervenir sur les réseaux intelligents :

- **Les opérateurs de réseau**

Ils pourront intégrer les informations de comptage intelligent en temps réel à leur centre de contrôle pour permettre une modélisation plus fine du réseau et de la demande, en lien avec les différents

usages.

- **Les fournisseurs**

Ils permettront un accès plus fréquent aux profils de consommation de leurs clients pour élaborer des offres de tarif et de service multiples.

- **Les consommateurs**

Ils pourront directement accéder à des informations concernant leur consommation.

Ils pourront, s'ils le souhaitent, connecter leur compteur avec le système de gestion énergétique et permettre un affichage déporté en temps réel des informations.

L'infrastructure passe par des moyens de communication et des concentrateurs de données associés à un système d'information capable de traiter et modéliser les données générées ainsi qu'à des technologies de contrôle-commande capables de piloter les compteurs. [4]

### **1.4.7. Fonctionnalités du système de comptage intelligent**

Un système de comptage intelligent peut offrir différentes fonctionnalités plus ou moins évoluées selon la complexité du système (compteurs – réseaux de communication – système central). On peut citer notamment :

- La relève des index à distance sur demande et automatiquement de façon périodique, permettant la tarification sur la base d'index réels (électricité et gaz) et la facilitation des emménagements / déménagements et des changements de fournisseur
- L'enregistrement et la relève et de la courbe de charge, permettant de proposer des tarifications distributeurs et fournisseurs variées (principalement électricité)
- La gestion dynamique de la puissance souscrite (limitation, modification) (électricité)
- La coupure et la remise en service à distance (principalement électricité)
- Le passage en mode prépaiement (électricité et gaz)
- La détection des fraudes (électricité)
- La mesure de la qualité de la fourniture (détection de coupure) (électricité)
- L'information du client, notamment sur sa consommation (électricité, gaz)
- La gestion des charges (délestage à distance) (électricité)

Ces différentes fonctionnalités visent donc à apporter des bénéfices aux différents acteurs de la chaîne de valeur (gestionnaires d'infrastructure, fournisseurs, producteurs et clients finals) :

- Diminution du coût du service rendu
- Diminution de la consommation énergétique des consommateurs.

- Amélioration de la sécurité d’approvisionnement et diminution des émissions de gaz à effet de serre (diminution de la pointe nationale à travers des tarifs multi horaires incitatifs et la coupure à distance de charges)
- Facilitation du fonctionnement du marché libéralisé
- Commercialisation de services à valeur ajoutée). [9]

#### **1.4.8. Compteurs intelligents (AMR)**

AMR (en anglais: Automatic Meter Reading) est un outil qui va bénéficier non seulement la partie de facturation des entreprises et abonnés, mais tous les autres consommateurs, ainsi que les petits producteurs qui composent notre SG. Donc les systèmes AMR permettront non seulement l'utilité d'obtenir le prix d'un kWh à tout moment, mais aussi il va permettre de lire la demande max avec horodatage, les niveaux de tension et le nombre des pannes sur chaque mis à jour. Cette technologie permet aux utilisateurs d'avoir beaucoup d'informations sur ses profils de consommation qui n'a jamais été disponible avant, tout ayant la possibilité d'avoir un accès rapide à l'information de chaque minute de la journée. La communication bidirectionnelle des données permet une grande capacité de collecter les informations préméditées entre les différents points de consommation, les dispositifs de contrôle et les postes d'opérateurs dans un SG. Donc, l'AMR est utilisé pour surveiller le flux de l'énergie électrique dans les zones de distribution .Avant les technologies du réseau intelligent, la seule façon de savoir s'il y avait un vol de puissance active c'était d'aller soit au point de consommation pour enquêter ou via une déclaration d'un autre abonné, toutefois le système AMR offre une détection très rapide dans les cas de vol de puissance.[8]

#### **1.4.9. Smart mètre**

Le compteur dit intelligent (Smart meter) assure le comptage d'énergie produite, injectée et consommée, il occupe une interface de communication internet entre les producteurs et les consommateurs d'énergie, il est employé particulièrement dans un réseau électrique intelligent (Smart Grid). Le Smart Meter est un appareil qui intègre des technologies avancées pour mesurer de manière fiable, efficace et en temps réel l'énergie consommée et produite par un client dans un réseau décentralisé. Il mémorise et restitue les informations concernant l'énergie, la puissance, la tension, les tarifs, etc. Entre autre, le compteur intelligent agit comme un serveur obéissant aux requêtes extérieures et n'est pas muni de capacité de décision et d'action propre [10].

## 1.5. Comparaison entre le réseau classique et réseau smart grid

Le système actuel et le smart grid sont caractérisés par les différences suivantes :

**Tableau 1.1.** Comparaison entre réseau classique et réseau smart [11]

<b>Caractéristiques des réseaux électriques actuels</b>	<b>Caractéristiques des réseaux électriques intelligents</b>
Analogique	Numérique
Unidirectionnel	Bidirectionnel
Production centralisée	Production décentralisée
Communicant sur une partie des réseaux électriques	Communicant sur l'ensemble des réseaux
Gestion de l'équilibre du système électrique	Gestion de l'équilibre du système électrique par la demande/consommation
Consommateur	Consom'ateur

## 1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les Smart grids, en montrant les exigences de la communication dans ces réseaux électriques intelligents. Pour éliminer les défauts dans un réseau électrique à flux unidirectionnel d'électricité, on passe vers un réseau électrique à flux bidirectionnel d'électricité et d'informations.

## Chapitre 02

# GENERALITES SUR LES PHOTOVOLTAÏQUES

### 2.1. Introduction

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

La consommation d'énergie mondiale et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ... etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine combustible. Certains Pays, se sont tourné vers la nouvelle forme d'énergie dite « renouvelable » faisant appel de façon directe ou indirecte à l'énergie solaire. Parmi celle-ci l'énergie photovoltaïque [12].

### 2.2. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

La lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k :

- Diamètre de soleil :  $D_s = 1.39.10^9 \text{m}$ .
- Diamètre de la terre :  $D_t = 1.27.10^7 \text{m}$ .
- Distance moyenne soleil-terre :  $L_{ts} = 1.5.10^{11} \text{m}$ . [13]

### 2.3. Effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces. La photopile ou cellule est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [14].

### 2.4. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de tension et de courant continu, variable selon l'influence de l'éclairement sur les panneaux solaires. Le composant de base de cette conversion est la cellule photovoltaïque. [15]

#### 2.4.1. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. La **figure (2.1)** illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium. [15]

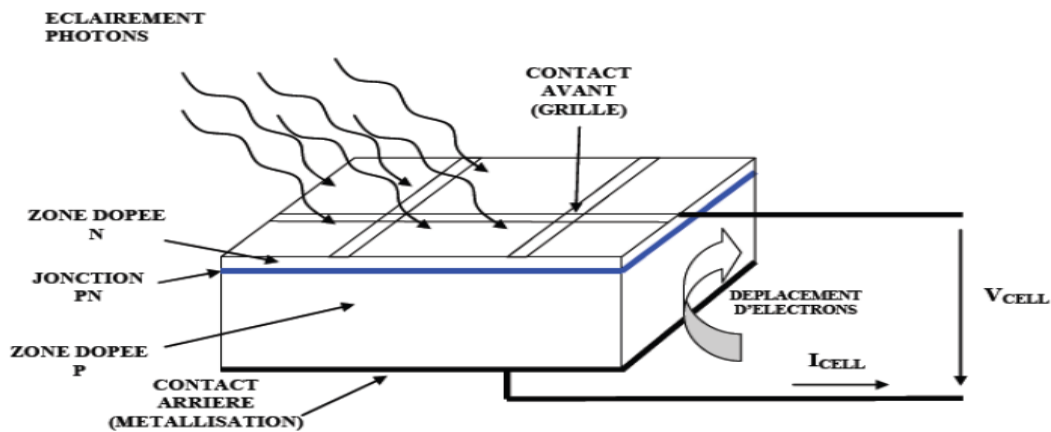


Figure 2.1. Structure d'une cellule photovoltaïque. [15]

### 2.4.2. Caractéristique énergétiques des cellules photovoltaïques

Comme dans tous les systèmes énergétiques, l'énergie disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est fonction de l'énergie entrante et des pertes

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{lumineuse}} - P_{\text{thermique}} \quad (2.1)$$

$E_{\text{électrique}}$  : Energie disponible aux bornes de la cellule (tension, courant).

$E_{\text{lumineuse}}$  : Energie incidente (flux lumineux).

$P_{\text{thermique}}$  : Pertes thermiques (par convection, rayonnement et conduction). [15]

#### 2.4.2.1. Rendement

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement reçue ou incidente :

$$\eta = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \quad (2.2)$$

#### 2.4.2.2. Réponse spectrale

On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique. [15]

### 2.4.3. Différents type de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule

est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

#### 2.4.3.1. Cellules monocristallines

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.

#### 2.4.3.2. Cellules poly cristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

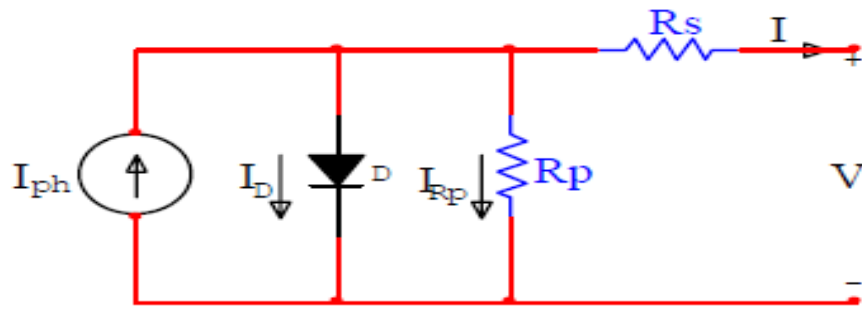
#### 2.4.3.3. Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

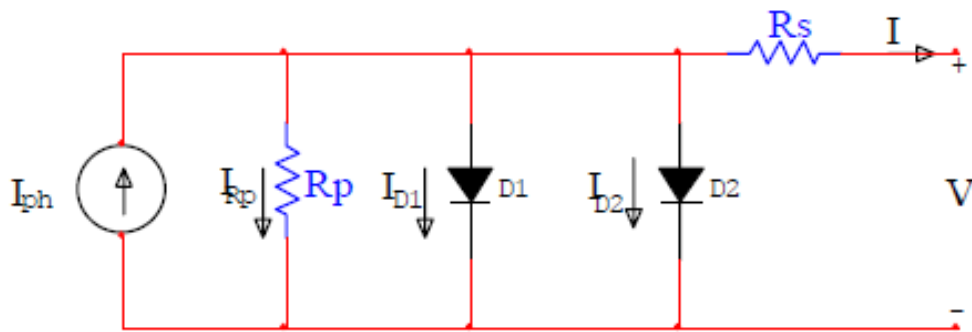
L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). [15]

### 2.4.4. Modèle de cellules solaires

Les circuits équivalents traditionnels de la cellule solaire, représentés par une source de courant parallèlement à une ou deux diodes sont montrés sur le schéma1. Le modèle simple de diode comprend quatre composants : une source de courant-photo, une diode parallèle à la source, une résistance en série  $s R$  et une résistance de shunt  $p R$ . Comme montré dans figure 2.1 (b), le modèle de double diode inclut une diode additionnelle pour un meilleur ajustement de courbes. Ce modèle exige la connaissance de quatre paramètres aux conditions standards de l'ensoleillement et de la température. Les paramètres sont généralement donnés par le fabricant ou peuvent être obtenus à partir des essais de module sous trois conditions : courant à court-circuit (  $I_{cc}$  ), tension à circuit ouvert (  $V_{co}$  ) et la tension (  $V_{mpp}$  ) et le courant (  $I_{mpp}$  ) au point maximum de puissance. Des coefficients de la température sont également nécessaires dans cette technique de modélisation pour considérer l'effet de la température sur les paramètres importants de la cellule solaire. [16]



(a)



(b)

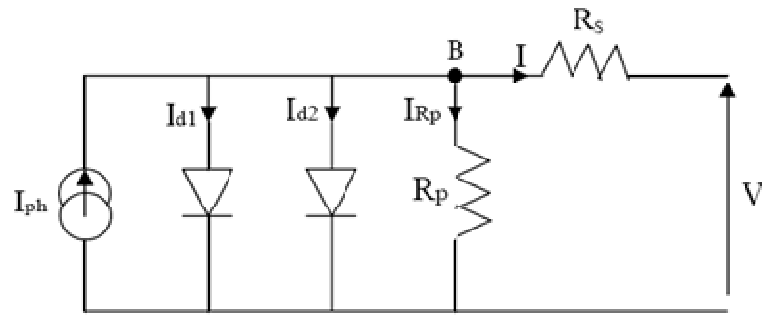
**Figure 2.2.** Circuits équivalents de cellules :(a)modèle simple-diode ;(b) modèle double-diode. [16]

## 2.5. Schéma équivalent des panneaux solaires photovoltaïques

Plusieurs modèles de cellules photovoltaïques qui sont à la base de la modélisation des panneaux solaires photovoltaïques existent. Dans notre cas nous avons choisi d'utiliser le modèle dit modèle à deux exponentielles ou encore modèle à deux diodes. Comporte les éléments suivants :

- Une source de courant modélisant la conversion du flux lumineux en électricité.
- Une diode d1 qui modélise la jonction P-N.
- Une diode d2 qui modélise le phénomène de recombinaison des porteurs minoritaires.
- Une résistance montée en série ( $R_s$ ) représentant la somme des résistances des différentes couches de la cellule.

Une résistance parallèle ( $R_p$ ) qui caractérise les courants de fuite dans la diode ainsi que les effets de bords de la jonction [17].



**Figure 2.3.** Schéma du modèle à deux exponentielles d'une photovoltaïque. [17]

A partir de ce schéma on peut déduire les équations caractéristiques d'un panneau photovoltaïque constitué de NS cellules montées en série en s'aidant des lois de Kirchhoff :

$$I = I_{PH} - I_{d1} - I_{d2} - I_{RP} \quad (2.3)$$

$$I = I_{ph} - I_{sat1} \left[ \exp\left(\frac{q(V + N_s R_s I)}{A_1 \cdot K \cdot N_s \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{sat2} \left[ \exp\left(\frac{q(V + N_s \cdot R_s \cdot I)}{A_2 \cdot K \cdot N_s \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot N_s \cdot I}{N_s \cdot R_p} \quad (2.4)$$

$$I_{sat1} = K_1 T^3 \exp[-E_g / KT] \quad (2.5)$$

$$I_{sat2} = K_2 T^{5/2} \exp[-E_g / KT] \quad (2.6)$$

Tel que:

I(A), Ampère : courant fourni par la cellule.

V(V), Volt : tension fournie par la cellule.

I<sub>ph</sub>(A), Ampère : photo courant ou courant générer éclairément.

I<sub>d1</sub> (A), I<sub>d2</sub> (A), Ampère : courants des diodes d1 et d2 respectivement.

I<sub>sat1</sub> (A), I<sub>sat2</sub> (A), Ampère : courants de saturation des diodes d1 et d2 respectivement.

q(C), Coulomb : charge d'un électron (q = 1.6 10<sup>-19</sup> C)

K (J /°K), Joule / degré kelvin : constante de Boltzmann (K = 1.38 10<sup>-23</sup> J / °K).

T (°K), degré Kelvin : température de la jonction.

K<sub>1</sub> = 1.2 A / cm<sup>2</sup> °K<sup>3</sup>.

K<sub>2</sub> = 2.9 10<sup>5</sup> A / cm<sup>2</sup> °K<sup>5/3</sup>.

E<sub>g</sub> (eV), électron Volt: énergie de gap.

R<sub>s</sub>, R<sub>p</sub> (Ω), Ohm : respectivement résistance série et résistance parallèle.

A<sub>1</sub> , A<sub>2</sub> : facteurs d'idéalité des diodes d1 et d2 respectivement (ou facteur de pureté). [17]

## 2.6. Caractéristiques électriques des panneaux solaires photovoltaïques

### 2.6.1. Courbe courant-tension

La (figure 2.4) représente la variation du courant qu'il produit en fonction de la tension à ses bornes.

- Tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  (pour  $I = 0$  CO) : pour la mesure en branchant directement un voltmètre aux bornes du panneau.

- Courant de court-circuit  $I_{CC}$  (pour  $V = 0$  CC) : pour la mesure en branchant un ampèremètre aux bornes du panneau.

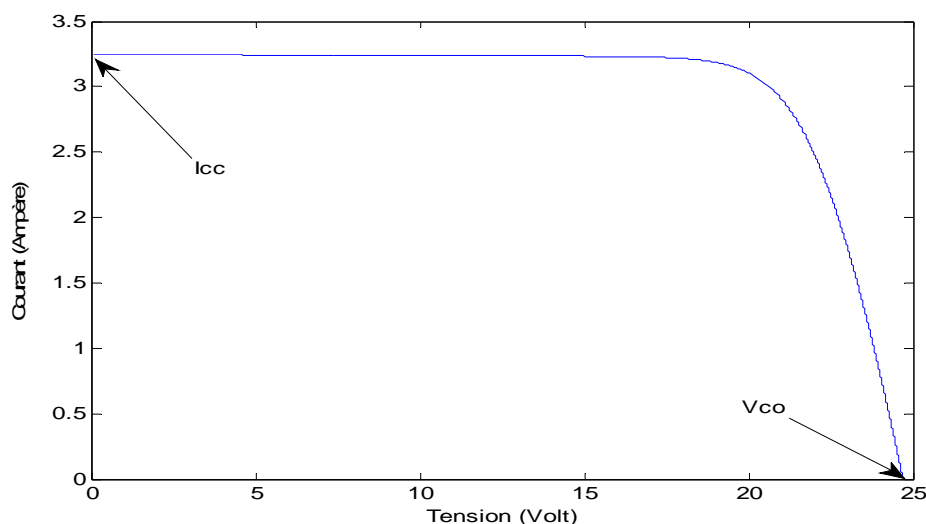


Figure 2.4. Caractéristique courant-tension d'un panneau solaire photovoltaïque. [17]

#### 2.6.1.1. Courbe de puissance

C'est la puissance électrique  $P(w)$  disponible aux bornes d'un panneau photovoltaïque.

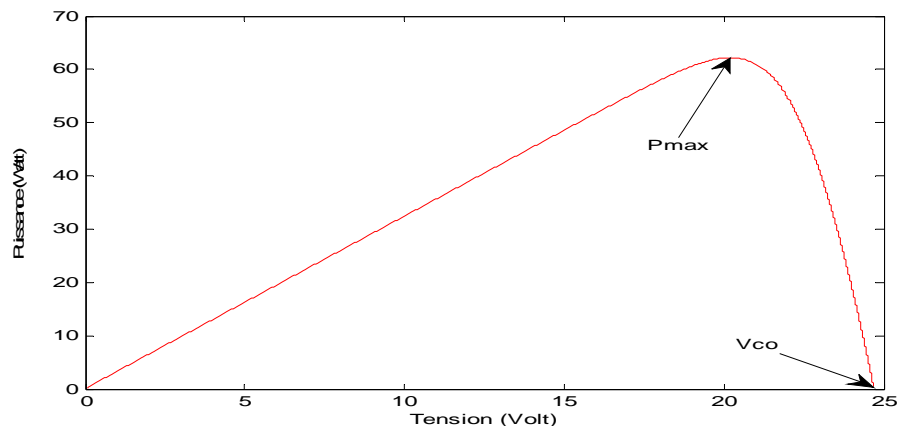
$$P = VI \quad (2.7)$$

#### 2.6.1.2. Puissance maximale

Pour un panneau solaire idéal, la puissance maximum  $P_{\max\_idéale}$  correspondrait à la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{CC}$  :

$$P_{\max\_idéale} = V_{CO} I_{CC} \quad (2.8)$$

Point de puissance maximum (ppm) est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , de même que le courant fourni  $I_{P_{\max}}$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{CC}$ .



**Figure 2.5.** Caractéristique puissance-tension d'un panneau solaire photovoltaïque. [17]

### 2.6.1.3. Facteur de forme

On appelle facteur de forme  $F$  le rapport entre la puissance maximum fournie par les panneaux  $P_{\max}$  et la puissance maximum d'un panneau idéal :

$$F = P_{\max} / (V_{C0} I_{CC}) = P_{\max} / P_{\max \text{ idéale}} \quad (2.9)$$


### 2.6.1.4. Puissance crête

La puissance crête représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites standard :

- Ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup> (correspondant à peu près à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil à midi par temps clair en été).
- Température de la cellule photovoltaïque égale à 25°C.
- Répartition spectrale du rayonnement dite « AM.1, 5 » (correspondant au rayonnement solaire parvenant au sol après avoir traversé une atmosphère de masse 1 à 45 °) [17]

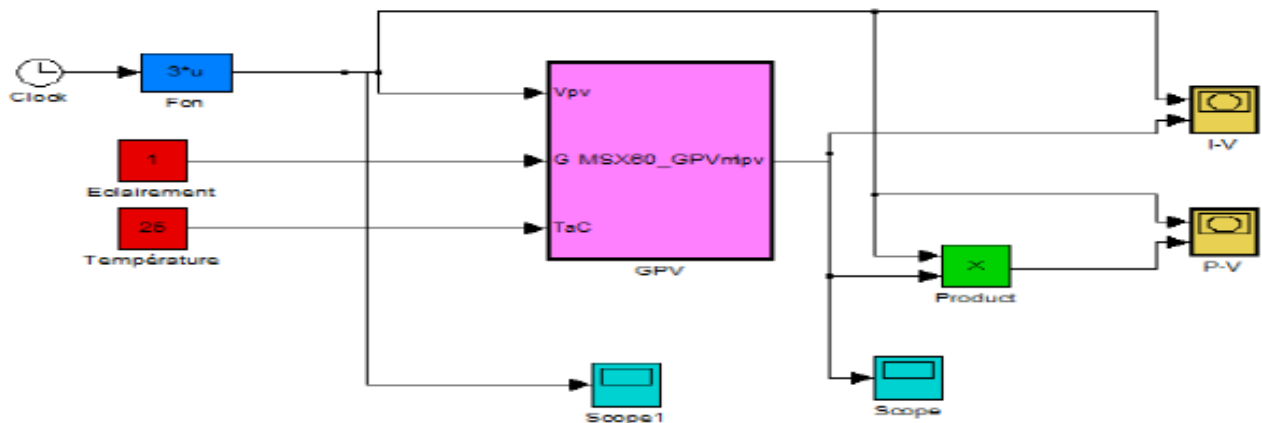
## 2.7. Simulation du générateur PV

Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant : [20]

Panneau solaire panasonaic HIT N240SE10		
	Puissance maximale( $p_{max}$ )(w)	180
	Tension de crete maximale( $v_{pm}$ )(v)	35 .5
	Courant de crete maximale ( $I_{pm}$ )(A)	6.77
	Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )(V)	43 .6
	Courant de court circuite ( $I_{sc}$ ) (A)	7.37
	Puissance maximale garantie ( $P_{min}$ ) (W)	228
	Protection max par surintensité inverse (A)	15
	Tolérance de puissane de sortie (%)	+10/-5
	Tension maxim de système (Vdc)	1000
	Ccoefficientet de température de $P_{max}$ (% /C°)	-0 .30
	Coefficient de température de $V_{oc}$ (V /c°)	-0.109
	Coefficient de température de $I_{sc}$ (mA /c°)	2.21
	Dimension(mm)	1610x861x35
	Poide(kg)	16.5
	Rendement de la celle	20%
Rendement du module	17 .3%	

**Figure 2.6.** Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque

Le schéma de générateur photovoltaïque sous l’environnement Matlab-Simulink est représenté par la figure suivante :



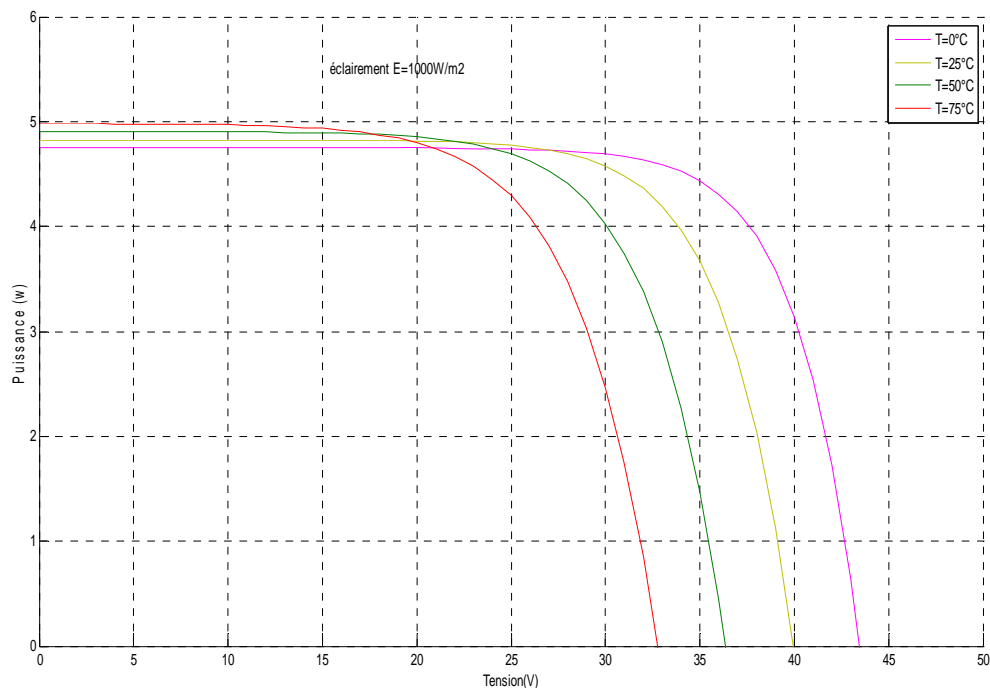
**Figure 2.7.** Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque représentent par les figures (2.8) à (2.10). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents températures et différents éclairements.

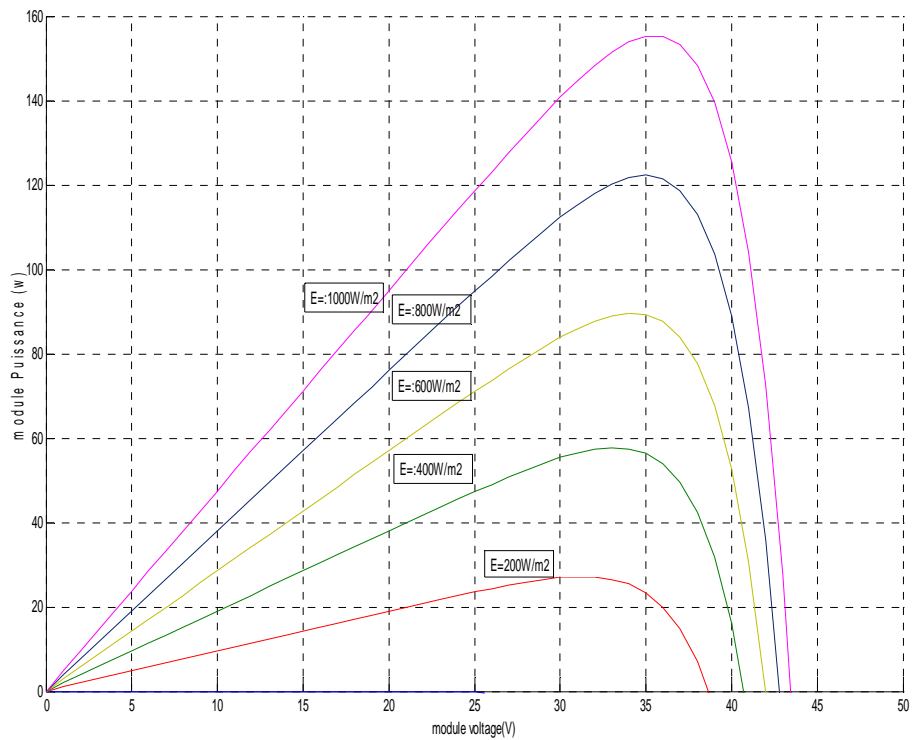
Les figures (2.8) et (2.9) ci-dessous montrent que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la figure (2.8) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

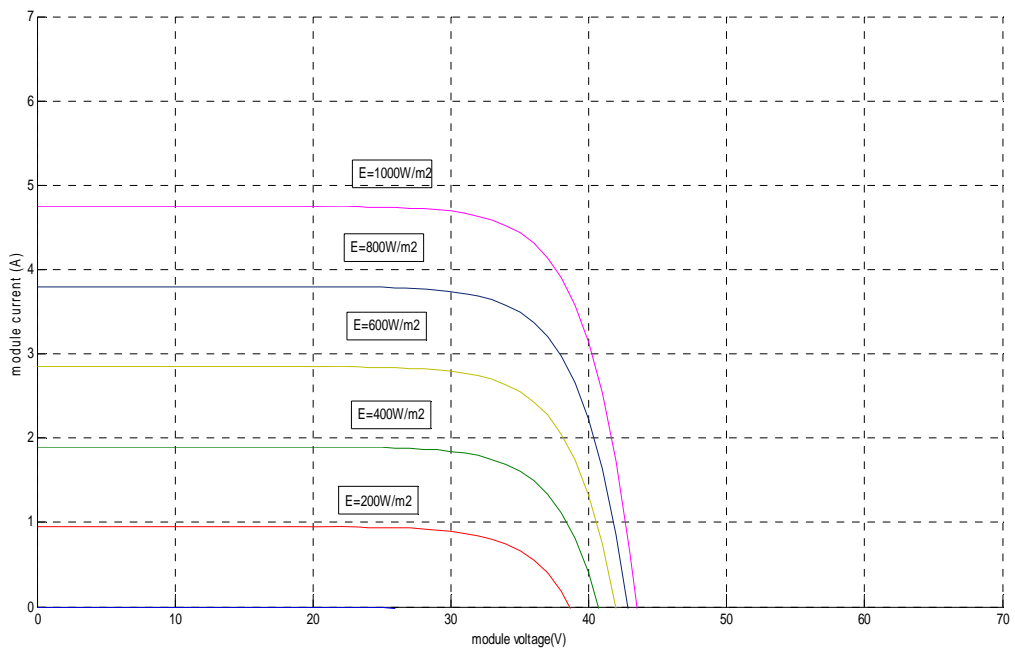
Les figures (2.9) et (2.10) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [18].



**Figure 2.8.** Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension, pour différentes températures et un éclairement  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ .



**Figure 2.9.** Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension, pour différentes températures et un éclairement  $G=1000\text{W/m}^2$ .



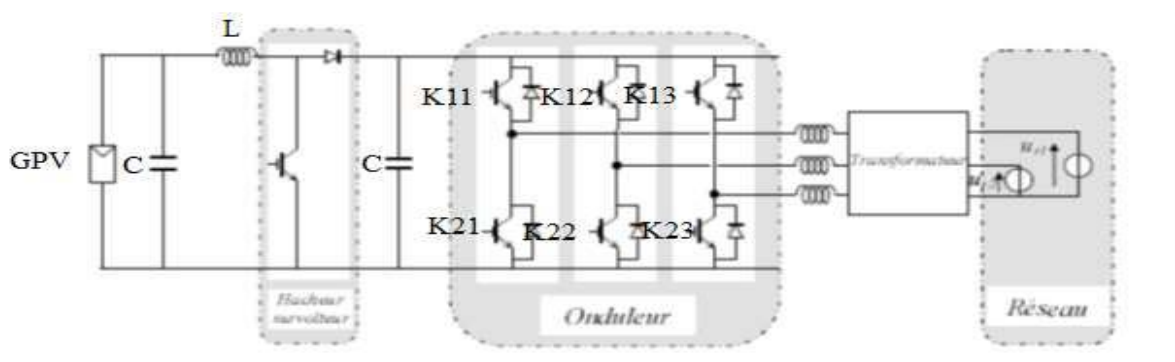
**Figure 2.10.** Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairement et une température  $T=25^\circ\text{C}$ .

## 2.8. Structure des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Deux types de structures de système photovoltaïque existent : un système à connexion directe au réseau à l'aide d'un onduleur et un système avec un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu – continu (un onduleur délivre une tension modulée) [19].

### 2.8.1. Structure avec hacheur et onduleur

Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un Convertisseur continu – continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD) On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau. Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable. ) [15]



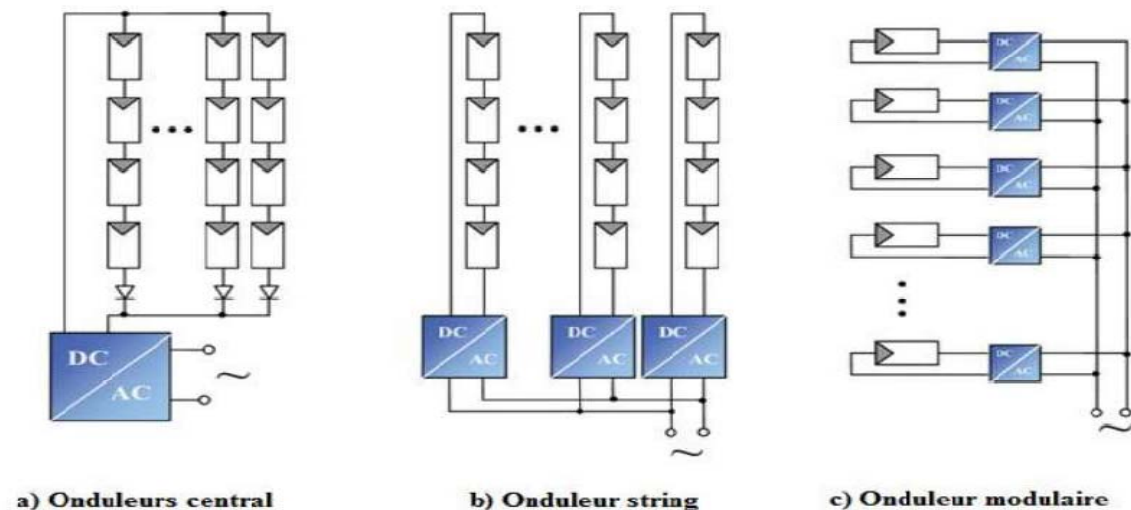
**Figure 2.11.** Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé. [19]

La figure (2.11) représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie production et la partie utilisation. L'avantage de ce système c'est que les batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome.

## 2.8.2. Structure des systèmes à connexion directe au réseau

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension (DC) de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V – 50Hz) mais ils exploitent sinusoïdale délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de également la puissance assurent une surveillance faible du réseau pour puissance maximum. De plus, ils interrompre l'alimentation en cas de protéger ce dernier contre les pannes et Actuellement, il existe problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation. Solutions techniques principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes

- Un seul onduleur pour toutes les installations (onduleur simple ou central, figure 2.11(a))
- Un onduleur string (pour chaque string, figure 2.11(b))
- Installations multi-onduleurs (installations multi-onduleurs, figure 2.11(c)) [19]

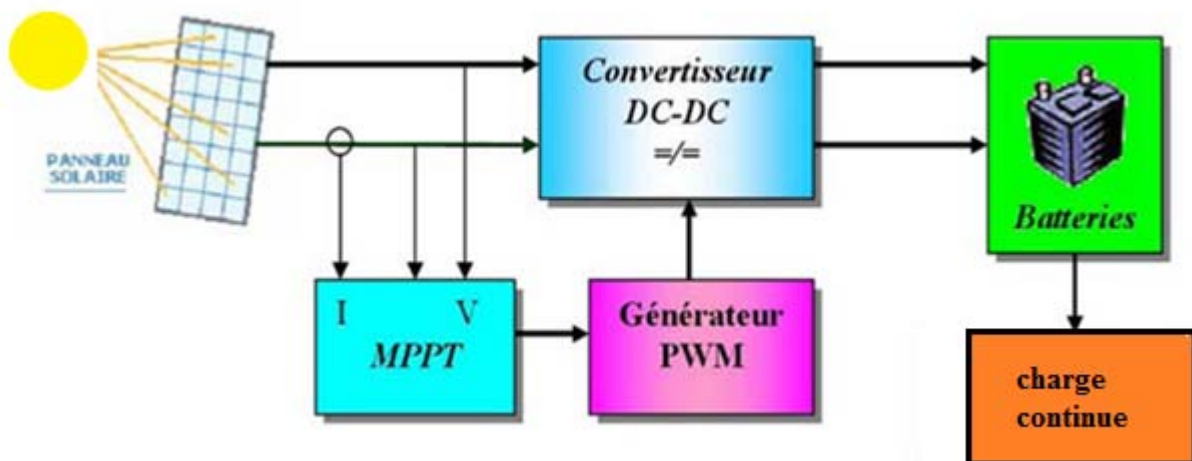


**Figure 2.12.** Différentes topologies des installations PV connectés aux réseaux électriques. [19]

## 2.9. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes.

La figure 2.13 montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.



**Figure 2.12.** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT. [18]

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant  $I$  et de tension  $V$  du module et la multiplication de ces deux grandeurs  $P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$ .

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée [18]

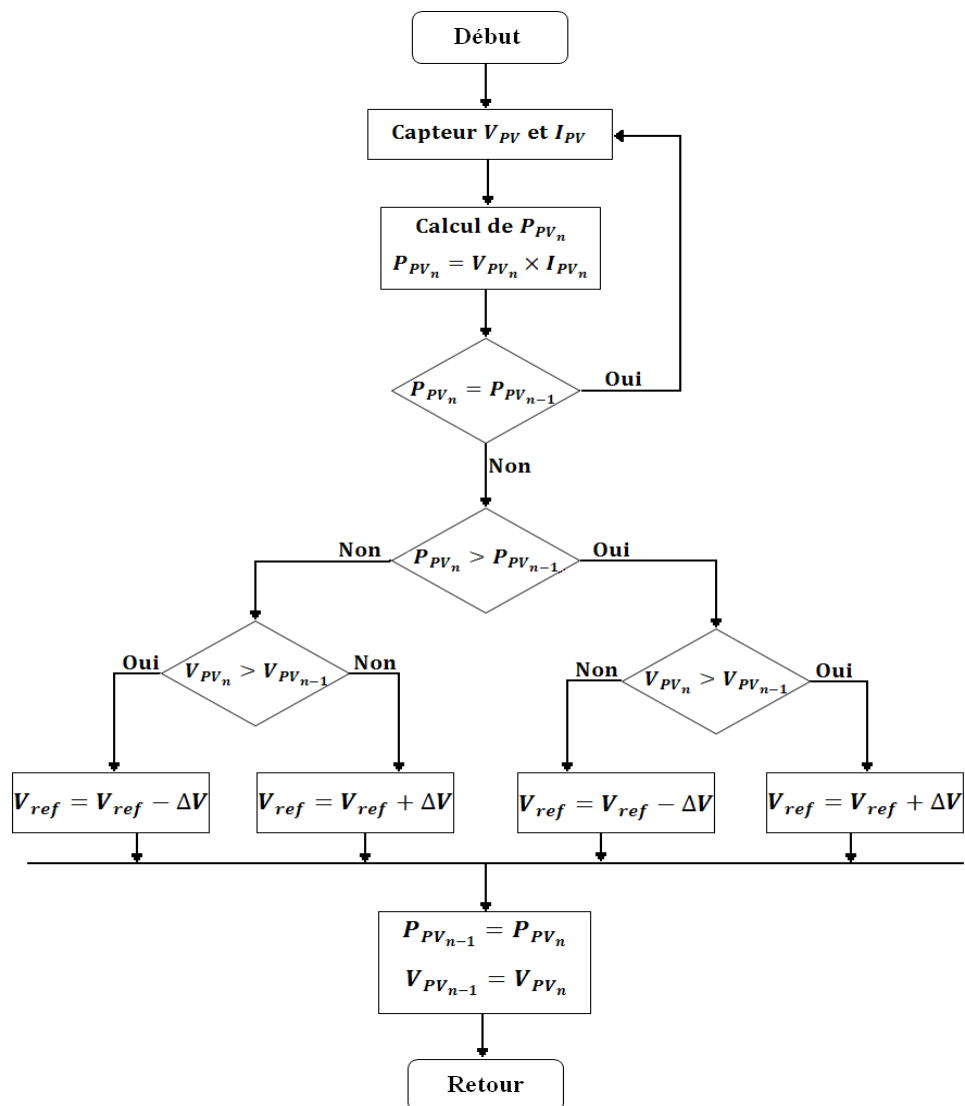
### 2.9.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension  $V_{pv}$  et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

La figure 2.14 représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle,  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurés pour calculer  $P_{pv}(n)$ . Cette valeur de  $P_{pv}(k)$  est comparée à la valeur  $P_{pv}(n-1)$  calculée au cycle

précédent. Si la puissance de sortie a augmenté,  $V_{pv}$  est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué,  $V_{pv}$  est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent.  $V_{pv}$  est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT. Quand le point de puissance maximale est atteint,  $V_{pv}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{op}$ . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins. [18]



**Figure 2.13.** Schéma Algorithme de la méthode MPPT « perturbation-observation » (p&o)

### 2.9.2. Résultat de Simulation par méthode « P&O »

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures suivantes. Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « P&O » effectuent correctement leurs rôles.

Le modèle de Simulink de l'algorithme P&O est présenté par la figure suivante :

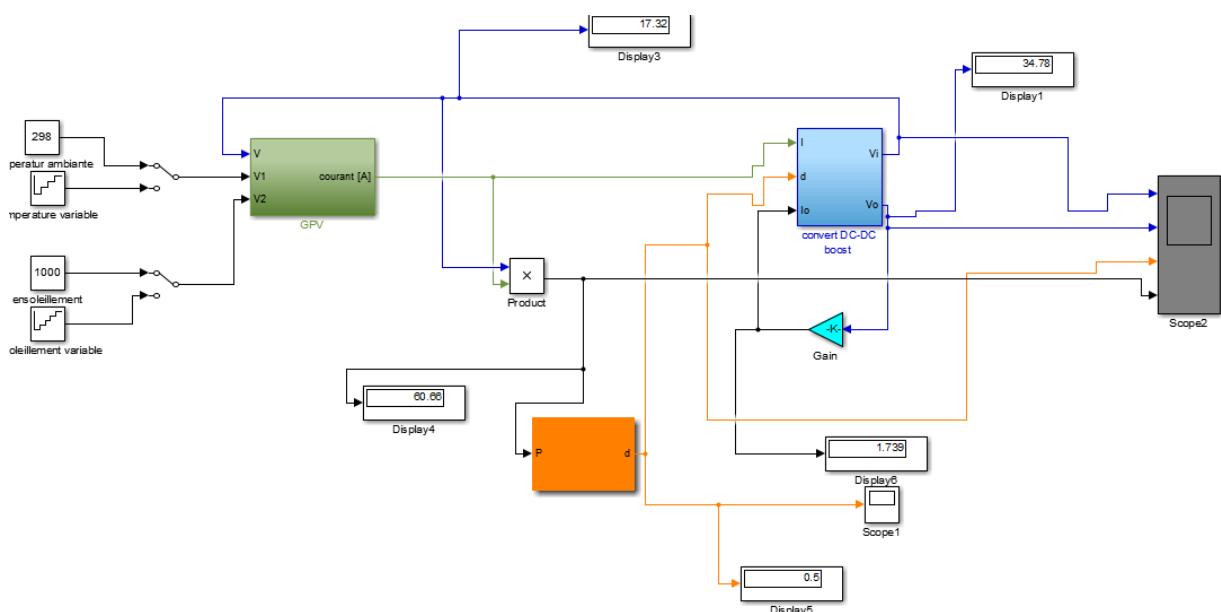


Figure 2.14. Schéma de simulink P&O sous Matlab

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes :

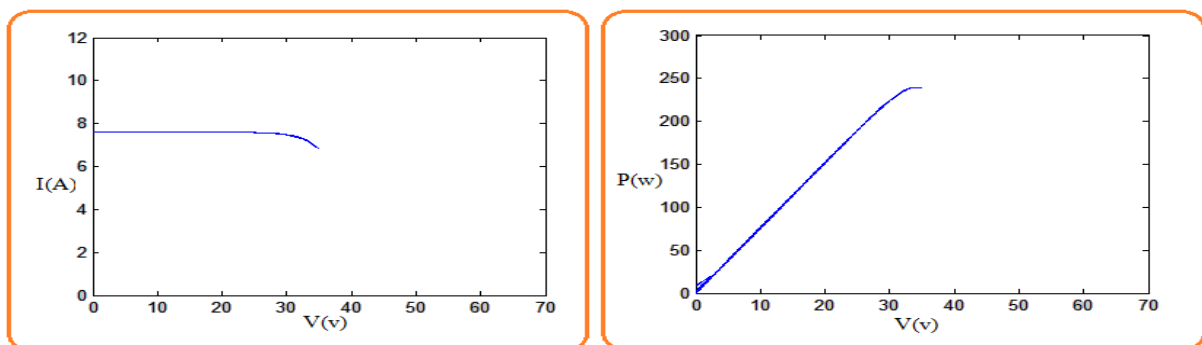
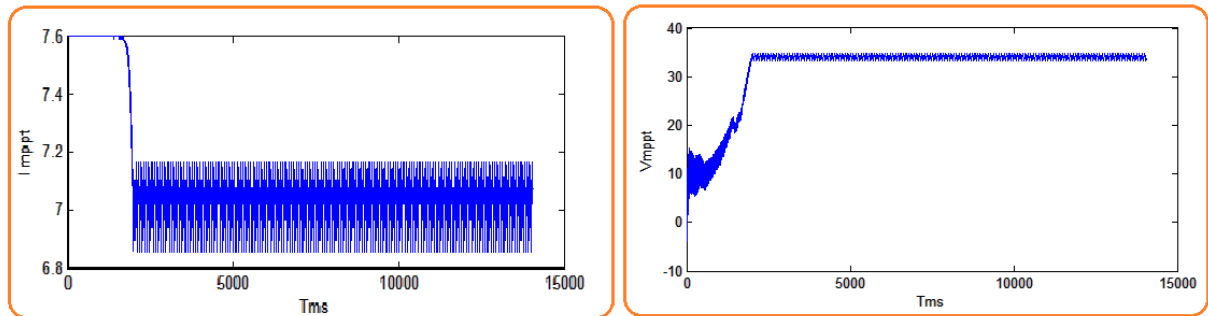
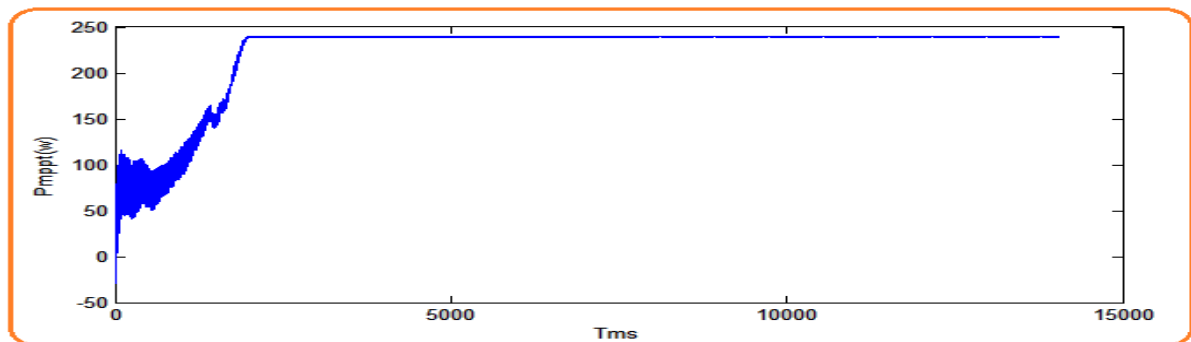


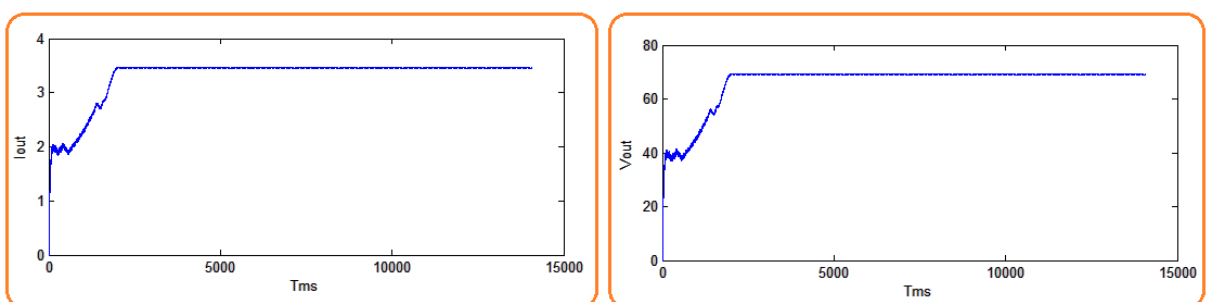
Figure 2.15. Résultats de simulation des courbes I(v) et P(v) générée par le générateur photovoltaïque pour  $G=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$  par méthode P&O.



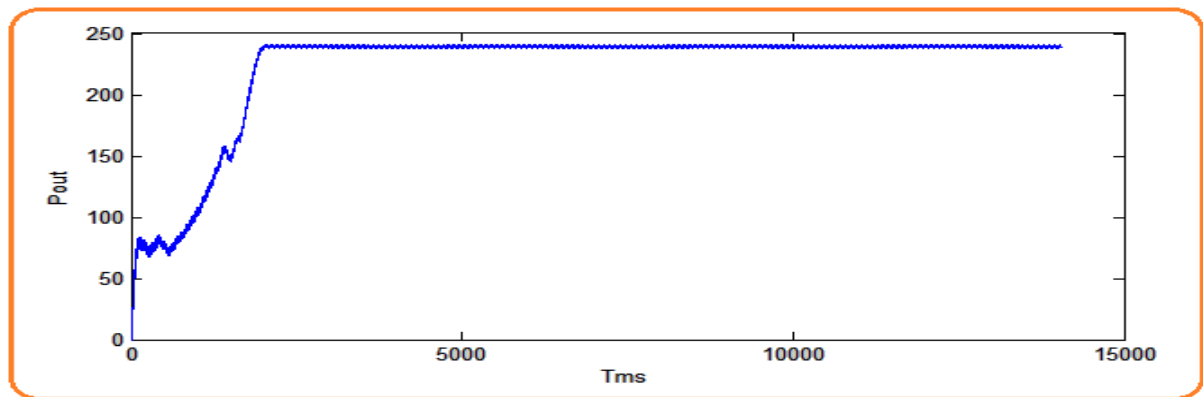
**Figure 2.16.** Résultats de simulation de la tension et courant générée par le générateur photovoltaïque pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  par méthode P&O.



**Figure 2.17.** Résultats de simulation de la puissance 'MPPT' générée par le générateur photovoltaïque pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  par méthode P&O



**Figure 2.18.** Résultats de simulation de la tension et courant de sortie du système global pour  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$  par méthode P&O.



**Figure 2.19.** Résultats de simulation de la puissance de sortie du système global pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  par méthode P&O.

## 2.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons représenté la modélisation et la simulation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation ». D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement  $1000\text{W/m}^2$

Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. Température  $25^\circ\text{C}$ .

La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

## Chapitre 03

# INTEGRATION DE PHOTOVOLTAÏQUE AU RESEAU ELECTRIQUE

### 3.1. Introduction

L'intégration des sources d'énergie renouvelable notamment les photovoltaïques dans les systèmes d'alimentation est gouvernée par sa configuration et les caractéristiques des différents composants qui constituent le système électrique. Ce dernier est constitué par les machines synchrones, excitatrices, stabilisateur de puissance (PSS), les lignes de transmission... etc. Ce chapitre présente les modèles du système électrique qui sont utilisés pour intégrer le système photovoltaïque qui a été simulé dans le chapitre précédent dans le système électrique.

### 3.2. Modèle simplifié d'un générateur synchrone

Un générateur synchrone peut être modélisé dans l'état d'équilibre ou dynamique. Dans l'état d'équilibre, un générateur synchrone est modélisé comme une source de tension délivrant une quantité requise de puissance dans le système. Étant donné que le système d'excitation d'un alternateur contrôle l'amplitude de la tension aux bornes de l'alternateur soit une tension  $E$  fournie au système. L'alternateur alimente également le système électrique par la puissance active et réactive. Dans les études de stabilité transitoire, la machine synchrone peut être représentée par une constante transitoire  $E' \angle \delta^\circ$  suivant l'axe direct des réactances transitoire ( $x'_d$ ). La machine est supposé de fonctionner dans une condition équilibrée de séquence positive dont il  $E$  est maintenu constant.[19]

La représentation vectorielle de la figure 3.1 donne :

$$V = E' - j(x'_d I) \quad (3.1)$$

Où :

$E'$  : la tension est la tension d'excitation de l'alternateur

$V$  : la tension terminale.

$I$  : le courant délivré par la machine pendant l'état transitoire

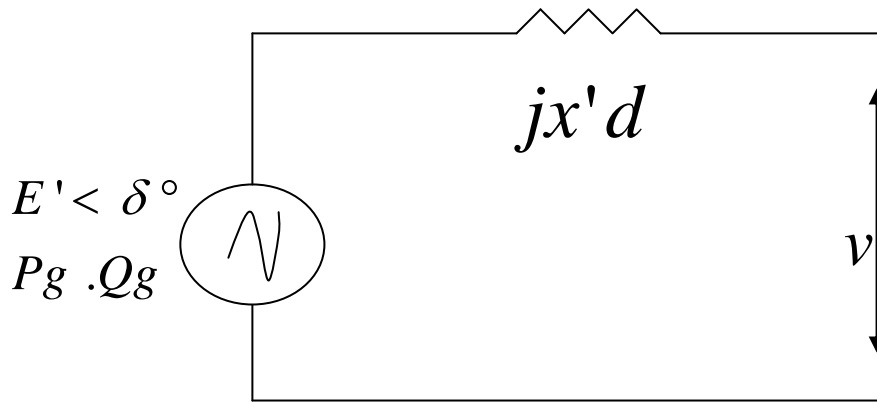


Figure 3.1. Représentation classique du générateur synchrone

On suppose que la charge est inductive :

$$V = |V| \angle 0, E' = |E'| \angle \delta^\circ, I = |I| \angle -\varphi \quad (3.2)$$

En outre, la puissance totale du générateur est donnée par :

$$S_g = VI^* = P_g + jQ_g \quad (3.3)$$

### 3.1. Modélisation de l'Etat- stable de la machine synchrone (aspects analytiques)

Comporte trois enroulements de phases a, b, c au stator et quatre enroulements au rotor dont un enroulement d'excitation et un enroulement d'amortisseur dans l'axe direct (d) et deux enroulements d'amortisseur dans l'axe en quadrature (q) avec couplage magnétique entre ces enroulements. [20]

Dans le développement des équations d'une machine synchrone, on admet les hypothèses suivantes :

- Les bobines de stator sont dans une configuration équilibrée et symétrique cantre 120 degrés entre eux.
- Le rotor comporte quatre bobines dans une configuration équilibrée et symétrique.
- La relation entre les liaisons de flux et les courants doivent être indépendants de 0 lorsqu'elle est exprimée dans le système de coordonnées dq0
- Les effets d'hystérésis et de saturations magnétiques sont négligeables

A l'état d'équilibre, tous les termes dérivés de temps abandon de l'équation dynamique de la machine, nous devons avoir une vitesse constante de rotor  $\omega$  ce qui nécessite  $\omega = \omega_s$ .

Les tensions directes et quadrature de la machine sont :

$$V_d = -R_s I_d - \psi_q \quad (3.4)$$

$$V_q = -R_s I_q - \psi_d \quad (3.5)$$

En supposant que le système est triphasé équilibré et les enroulements amortisseurs sont égale à zéro, les équations algébriques peuvent être résolus dans le fonctionnement en régime permanent, qui sont comme suit :

$$0 = -E'_q - (X_d - X'_d)I_d + E_{fd} \quad (3.6)$$

$$0 = -\psi_{id} + E'_q - (X'_d - X_{is})I_d \quad (3.7)$$

$$0 = -E'_d - (X_q - X'_q) \quad (3.8)$$

$$0 = -\psi_{2d} - E'_d - (X'_q - X_{is})I_d \quad (3.9)$$

$$0 = T_M - (\psi_d I_q - \psi_q I_d) - T_{FW} \quad (3.10)$$

$$\psi_d = E'_q - X'_d I_d \quad (3.11)$$

$$\psi_q = -E'_d - X'_q I_q \quad (3.12)$$

Toutes les équations sont linéaires et qui peuvent être facilement résolus pour divers état d'équilibre sauf les équations (3.11) et (3.12).

On substitue les équations (3.11) et (3.12) dans (3.4) et (3.5), on aura :

$$V_d = -R_s I_d + E'_d + X'_q I_q \quad (3.13)$$

$$V_q = -R_s I_q + E'_q + X'_d I_d \quad (3.14)$$

Les deux équations précédentes peuvent être réécrites comme une équation complexe :

$$(V_d + jV_q) e^{j(\delta - \pi/2)} = -(R_s + jX_q)(I_d + jI_q) e^{j(\delta - \pi/2)} + \bar{E} \quad (3.15)$$

Par conséquent, la relation entre la tension de charge et de la tension interne de la machine est :

$$\bar{V} = -(R_s + jX_q)I^* + \bar{E} \quad (3.16)$$

Le modèle statique de la machine synchrone mentionné précédemment peut être représenté par le schéma de circuit de la figure 3.2.

La tension  $\bar{E}$  peut être réécrite sou la forme suivante :

$$\begin{aligned} \bar{E} &= [(E'_d - (X_q - X'_q)I_q) + j(E'_q + (X_q - X'_d)I_d)] e^{j(\delta - \pi/2)} \\ &= j[(X_q - X'_d)I_d + E'_q] e^{j(\delta - \pi/2)} \end{aligned} \quad (3.17)$$

La tension  $\bar{E}$  peut être encore simplifiée, en utilisant l'équation (3.6), on trouve :

$$\begin{aligned} \bar{E} &= j[(X_q - X_d)I_d + E_{fd}]e^{j(\delta-\pi/2)} \\ \bar{E} &= [(X_q - X_d)I_d + E_{fd}]e^{j\delta} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Tel que  $\delta$  l'angle de la tension E.

Par ailleurs, le rapport entre le courant de champ ( $I_{fd}$ ) et la réactance de magnétisation ( $X_{md}$ ) est :

$$I_{fd} = \frac{E_{fd}}{X_{md}} \quad (3.19)$$

Le couple électrique est donné par l'expression suivante :

$$T_{Elec} = \psi_d I_q - \psi_q I_d = V_d I_d + V_q I_q + R_s (I_d^2 + I_q^2) \quad (3.20)$$

La puissance active délivrée par la source contrôlée de la figure 3.1 est donnée par l'expression :

$$\begin{aligned} P_{out} &= \text{Real}(\bar{V}I^*) = \text{Real}\left((V_d + jV_q)e^{-j(\delta-\pi/2)}(I_d - jI_q)e^{j(\delta-\pi/2)}\right) \\ &= \text{Real}\left((V_d + jV_q)(I_d - jI_q)\right) \\ &= \psi_d I_q + \psi_q I_d \end{aligned} \quad (3.21)$$

Aussi, la puissance réactive est donnée par :

$$\begin{aligned} Q_{out} &= I_{mag}(\bar{V}I^*) = I_{mag}\left((V_d + jV_q)e^{-j(\delta-\pi/2)}(I_d - jI_q)e^{j(\delta-\pi/2)}\right) \\ &= I_{mag}\left((V_d + jV_q)(I_d - jI_q)\right) \\ &= \psi_d I_q + \psi_q I_d \end{aligned} \quad (3.21)$$

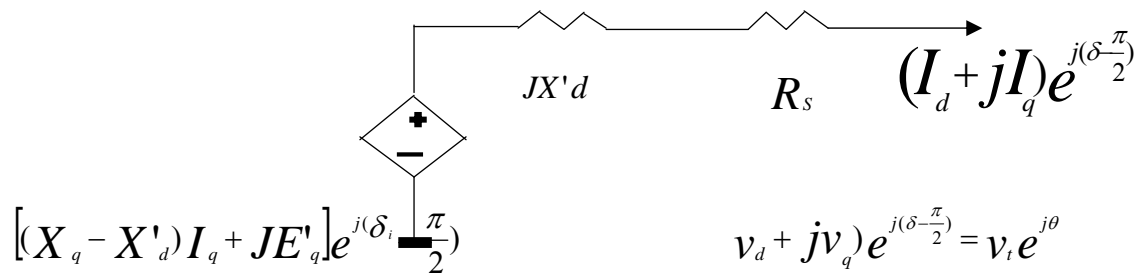


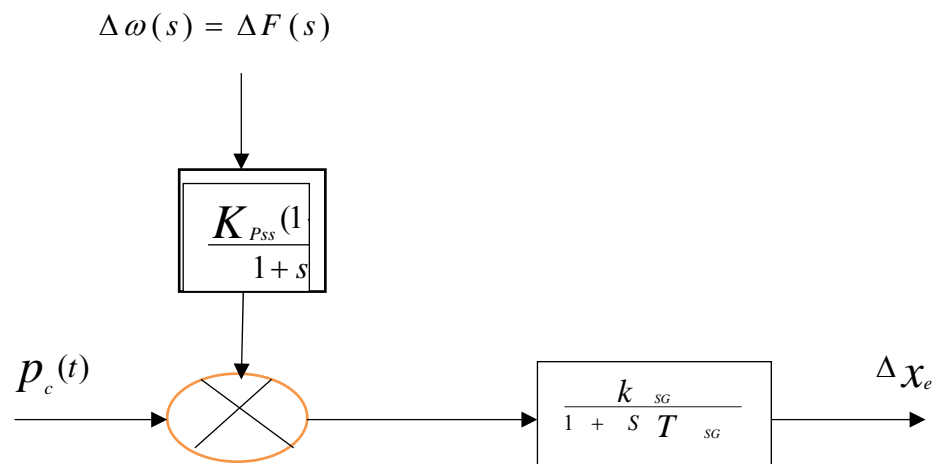
Figure 3.2. Modèle de l'état statique de la machine synchrone

### 3.2. Modèle des régulateurs [19.21]

Si la charge augmente, la vitesse de rotation du générateur synchrone diminue légèrement. Dans le cas d'une centrale thermique, les régulateurs réagissent à cette variation de vitesse et permet l'entrée de vapeur de la chaudière vers la turbine pour puisse augmenter la vitesse. Le débit de vapeur augmente réduit la pression de la chaudière, qui rétablit les augmentations d'un débit de carburant, l'air et l'eau suffisante pour relâcher la pression de vapeur. Heureusement, la forte inertie thermique de la plupart des systèmes de chaudière permet l'exécution de la fréquence de la charge de la turbine, de générateur et de la charge pour découpler de celle de la chaudière, de sorte que pendant une courte durée de changement de charge, la pression de la chaudière peut être considérée comme constante. Le générateur détermine principalement la réponse à court terme du système à la fluctuation de la charge.

De nombreuses formes de système de génération ont été imaginées, ce qui implique d'une manière ou d'autre, la variation de la vitesse de l'arbre de la turbine du générateur comme une base sur laquelle la modification de la position de la turbine et la vanne de commande de fluide actionne.

La caractéristique de régulateur de vitesse typique pour la plupart se situent entre 5 et 10. La dernière tendance dans la conception des turbines et du régulateur est de fournir un contrôleur électronique. Une représentation de schéma synoptique du système de régulateur de vitesse est représentée dans la figure 3.3 .



**Figure 3.3.** Block diagramme de représentation de la vitesse du régulateur.

$$\Delta x_e = \frac{K_{SG}}{1 + sT_{SG}} \left( \Delta P_c - \frac{1}{R} \Delta \omega \right) \quad (3.22)$$

Tel que :

$R$  : Régulation de vitesse du régulateur

$K_{SG}$  : Gain de régulateur de vitesse

$T_{SG}$  : Constante de temps de régulateur

Dans le cas d'une centrale hydraulique, Les régulateurs de vitesse de la turbine est plus compliquée, Une boucle supplémentaire de rétroaction fournit une compensation temporaire de statisme pour empêcher l'instabilité .cette est rendue nécessaire par la grande inertie de la vanne de la conduite forcée qui régule le taux d'entrée de l'eau à la turbine.

L'équation (3.21) joue un rôle important dans la modélisation du fonctionnement du régulateur

Soient Considérons un exemple simple. En supposant un incrément de  $\Delta P_c = 1.0$  pour  $t=0$  pour le système de régulation de vitesse opération sur boucle ouverte  $\Delta \omega = 0$  résultant de l'incrément

dans l'ouverture de la vanne de vapeur  $\Delta x_e$  est obtenue à partir de l'équation (3.22)  $\Delta x_e = \frac{K_{SG}}{s(1 + sT_{SG})}$

et en utilisant la transformation de Laplace de  $\Delta P_c$

$$\Delta x_e = \frac{\frac{K_{SG}}{T_{SG}}}{s \left( s + \frac{1}{T_{SG}} \right)} \quad (3.23)$$

Après des manipulations mathématiques

$$\Delta x_e = \frac{K_{SG}}{s} - \frac{K_{SG}}{s + \frac{1}{T_{SG}}} \quad (3.24)$$

La transformée inverse de Laplace donne :

$$\Delta x_e(t) = K_{SG} \left( 1 - e^{-t/T_{SG}} \right) \text{ Avec } t \geq 0 \quad (3.25)$$

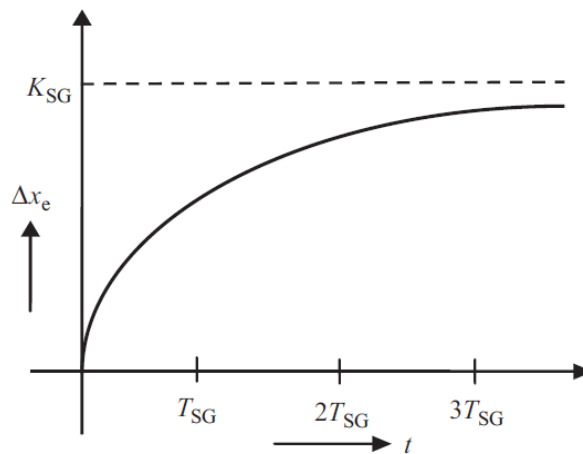


Figure 3.4. La réponse de régulateur de vitesse

### 3.3. Modèle de Turbine

L'étude de comportement dynamique de la turbine est importante. Cette dynamique dépend du type de turbine utilisée. La figure 3.5 montre le diagramme en cas d'une turbine à vapeur.

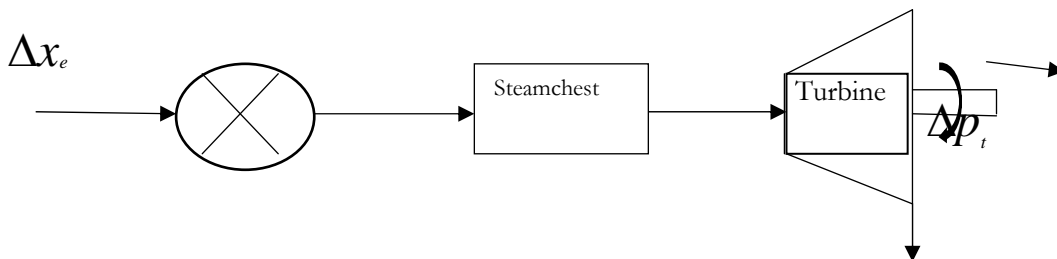


Figure 3.5. Diagramme d'une turbine à vapeur.

Après avoir passé le contrôle de la vanne de régulation, la vapeur à haute pression pénètre dans la turbine (Steam chest) dans un temps de  $T_t$  (à l'ordre de 0,2-0,5 s). Le flux de vapeur résultant à une fonction de transfert donné par l'équation 2.26. Le schéma de la turbine et du régulateur est présenté dans la figure 3.6.

$$G_T = \frac{\Delta p_t(S)}{\Delta x_e(S)} = \frac{1}{1 + sT_T} \tag{3.26}$$

En supposant que la commande est minimum pour  $\Delta P_C$ , dans l'état stable on a :

$$\Delta p_t = K_{SG} K_T \Delta p_C \tag{3.27}$$

Il faut choisir un facteur pour  $\Delta P_C = \Delta p_t$ . Pour cela, le facteur  $K_{SG} K_T = 1$ . Le modèle équivalent

est montré par la figure 3.7.

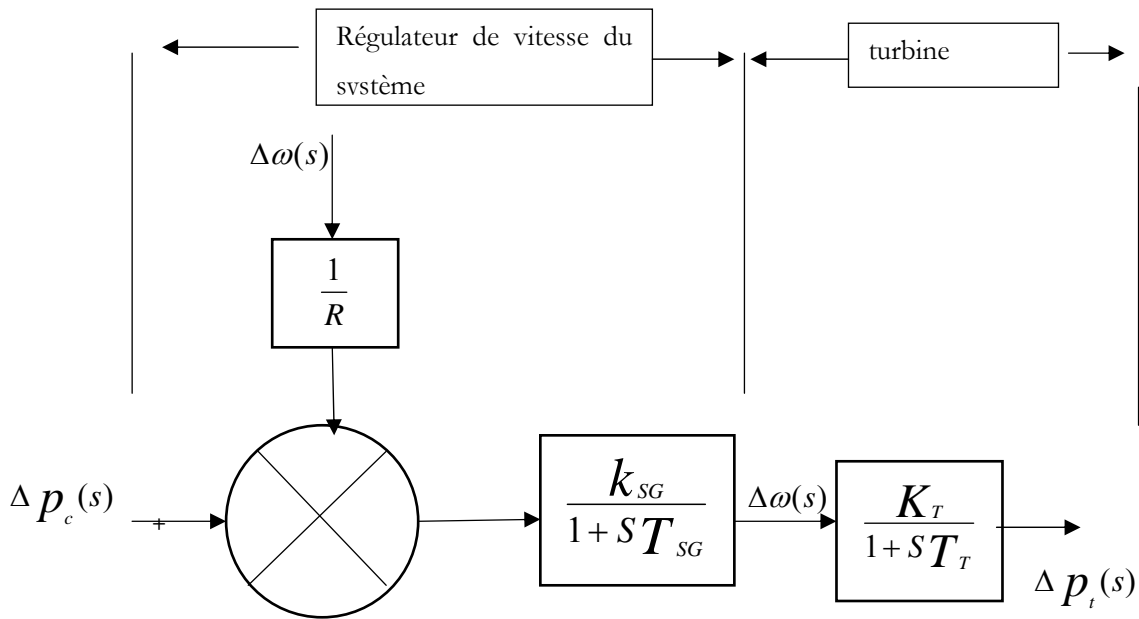


Figure 3.6. Schéma block de régulateur de la turbine

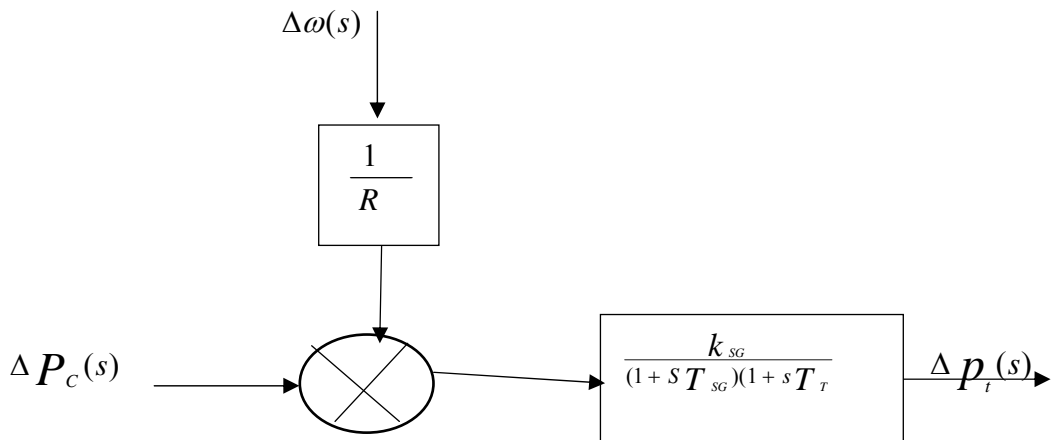


Figure 3.7. Modèle déduit de la turbine avec le régulateur

### 3.4. Modèle de réseau électrique

Un système électro-énergétique (réseau d'énergie électrique et appelé aussi système de puissance) se compose d'éléments (machine synchrone, transformateurs, lignes,...), plus ou moins nombreux selon la taille du réseau, interconnectés, figure. 3.8.

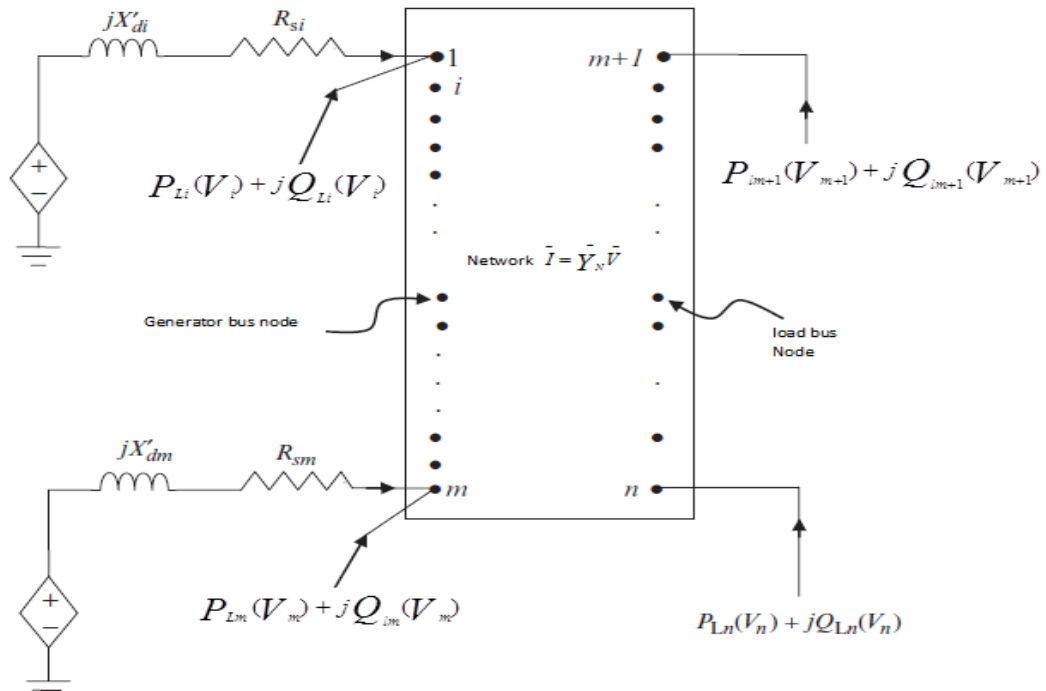


Figure 3.8. Modèle déduit de la turbine avec le régulateur

L'équation de réseau pour les jeux de barres connectés aux générateurs sont donnés par :

$$V_i e^{j\theta_i} (I_{d_i} - I_{q_i}) e^{-j(\delta_i - \pi/2)} + P_{L_i}(V_i) + jQ_{L_i}(V_i) = \sum_{K=1}^n V_i V_k Y_{ik} e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})} \quad (3.28)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$  c'est le nombre de jeux de barres des générateurs.

L'équation de réseau pour les jeux de barres de charge est :

$$P_{L_i}(V_i) + jQ_{L_i}(V_i) = \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})} \quad (3.29)$$

$i = m+1, m+2, m+3, \dots, n$  nombre de jeux de barres de charge.

On peut écrire  $V_i e^{j\theta_i} (I_{d_i} - I_{q_i}) e^{-j(\delta_i - \pi/2)} = P_{G_i} + jQ_{G_i}$  qui est la puissance complexe " injectée " dans le jeu de barre  $i$  en présence d'une génératrice, et  $\bar{Y}_{ik}$  est  $ik$  l'élément de la matrice admittance du réseau, cette matrice est formée en utilisant toutes les branches sous la forme  $\bar{Y}_{ik} = G_{ik} + B_{ik}$ .

Les équations de réseau pour les jeux de barres des générateurs sont séparées en parties réelles et imaginaires, sont représentés dans la forme suivante :

$$I_{d_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{q_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + P_{L_i}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k K_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (3.30)$$

$$I_{d_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - I_{q_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + Q_{L_i}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k V_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (3.31)$$

Où  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  pour les jeux de barres des générateurs

De même, les formes des puissances pour les jeux de barres de charge sont :

$$P_{L_i}(V_i) - \sum_{K=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (3.32)$$

$$Q_{L_i}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (3.33)$$

Où  $i = m+1, m+2, m+3, \dots, n$  pour les jeux de barres de charge

Ces équations sont non linéaires. La linéarisation de l'équation du réseau (3,29) et (3,30) appartenant aux jeux de barres générateur (bus PV) sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} 0 = & (I_{d_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) I_{q_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i)) \Delta \delta_i + V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \Delta I_{d_i} + V_i \cos(\delta_i - \theta_i) \Delta I_{q_i} \\ & + \left( I_{d_i} \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{q_i} \cos(\delta_i - \theta_i) - \left[ \sum_{K=1}^n V_K Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \right] + \frac{\partial P_{L_i}(V_i)}{\partial V_i} \right) \Delta V_i \\ & + \left( -I_{d_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + I_{q_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + \left[ V_i \sum_{K=1}^n V_K K_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \right] \right) \Delta \theta_i \\ & - V_i \sum_{K=1}^n (Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})) \Delta V_k - V_i \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq i}}^n [V_i Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})] \Delta \theta_i \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} 0 = & (-I_{d_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - I_{q_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i)) \Delta \delta_i + V_i \cos(\delta_i - \theta_i) \Delta I_{d_i} - V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \Delta I_{q_i} \\ & + \left( I_{d_i} \cos(\delta_i - \theta_i) I_{q_i} \sin(\delta_i - \theta_i) - \left[ \sum_{K=1}^n V_K Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \right] + \frac{\partial Q_{L_i}(V_i)}{\partial V_i} \right) \Delta V_i \\ & + \left( I_{d_i} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{q_i} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - \left[ V_i \sum_{K=1}^n V_K Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \right] \right) \Delta \theta_i \\ & - V \sum_{K=1}^n V_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \Delta V_k + V_i \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq i}}^n [V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})] \Delta \theta_k \end{aligned} \quad (3.35)$$

Où  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  pour les jeux de barres des générateurs

La linéarisation de l'équation du réseau (3,31) et (3,32) appartenant aux jeux de barres charge (bus PQ) sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
0 &= \frac{\partial P_{L_i}(V_i)}{\partial V_i} \Delta V_i - \left[ \sum_{K=1}^n V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_i \\
&+ \left[ \sum_{\substack{K=1 \\ \neq i}}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \right] \Delta \theta_i - V \sum_{K=1}^n [Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})] \Delta V_K \\
&- V_i \sum_{\substack{K=1 \\ \neq i}}^n [V_k K_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})] \Delta \theta_k
\end{aligned} \tag{3.36}$$

$$\begin{aligned}
0 &= \frac{\partial Q_{L_i}(V_i)}{\partial V_i} - \left[ \sum_{K=1}^n V_K Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_i \\
&- \left[ \sum_{\substack{K=1 \\ \neq i}}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \right] \Delta \theta_i \\
&- V_i \sum_{K=1}^n [Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})] \Delta V_k + [V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})] \Delta \theta_K
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Pour  $i=m+1, m+2, m+3, \dots, n$  (nombre de jeux de barres de charge).

### 3.5. Modèle de la charge

La charge dans le réseau électrique dépend de l'amplitude de la tension au jeu de barre et de la fréquence. Un modèle de charge exprime les caractéristiques de la composante de puissance active  $P_L$  et la composante de puissance réactive  $Q_L$ . Elles sont incorporées dans l'équation du réseau (3,35) et (3,36) du modèle dynamique du système multi-machines. La dépendance de la tension des caractéristiques de la charge dans tous les jeux de barres « i » a été représenté par le modèle exponentiel [22].

$$P_{L_i} = P_{L_{i0}} \left( \frac{V_i}{V_{i0}} \right)^{n_{pi}} \tag{3.38}$$

$$Q_{L_i} = Q_{L_{i0}} \left( \frac{V_i}{V_{i0}} \right)^{n_{qi}} \tag{3.39}$$

où :  $i = m + 1, m + 2, \dots, n$  ( nombre de jeux de barres PQ ) ici ,  $P_{L_{i0}}$  et  $Q_{L_{i0}}$  sont les puissances nominales active et réactive , respectivement , au bus i , avec l'amplitude de tension nominale  $V_{i0}$  .

$P_{L_i}$  et  $Q_{L_i}$  sont les composantes de puissance active et réactive de la charge lorsque l'amplitude de la tension au jeux de barres est  $V_i$ .  $n_{pi}$  et  $n_{qi}$  sont des indices de charge dont, trois types de modèles

de charge statique qui peut être configurée en fonction de la valeur de ces indices :

- Puissance constante ( $n_p = n_q = 0$ )
- Courant Constant ( $n_p = n_q = 1$ )
- Impédance Constante ( $n_p = n_q = 2$ )

Pour une charge de type puissance constant, les équations (3.38) et (3.39) deviennent :

$$P_{L_i} = P_{L_{io}} \quad (3.40)$$

$$Q_{L_i} = Q_{L_{io}} \quad (3.41)$$

Pour une charge de type courant constant, les équations (3.38) et (3.39) deviennent :

$$P_{L_i} = P_{L_{io}} \left( \frac{V_i}{V_{io}} \right) \quad (3.42)$$

$$Q_{L_i} = Q_{L_{io}} \left( \frac{V_i}{V_{io}} \right) \quad (3.43)$$

Encore une fois, pour une charge de type courant constant, les équations (3.38) et (3.39) deviennent :

$$P_{L_i} = P_{L_{io}} \left( \frac{V_i}{V_{io}} \right)^2 \quad (3.44)$$

$$Q_{L_i} = Q_{L_{io}} \left( \frac{V_i}{V_{io}} \right)^2 \quad (3.45)$$

Pour la charge non linéaire, les valeurs de  $n_{p_i}$  et  $n_{q_i}$  dépend des caractéristiques globales des composants de charge, et le modèle de charge exponentiel devient alors un polynôme. Par conséquent, le modèle de charge polynomiale pour la puissance active et réactive est :

$$P_{L_i} = P_{L_{io}} + P_{L_{io}} \left( \frac{V_i}{V_{io}} \right) + P_{L_{io}} \left( \frac{V_i}{V_{io}} \right)^2 \quad (3.46)$$

$$Q_{L_i} = Q_{L_{io}} + Q_{L_{io}} \left( \frac{V_i}{V_{io}} \right) + Q_{L_{io}} \left( \frac{V_i}{V_{io}} \right)^2 \quad (3.47)$$

Pour  $i = m + 1, m + 2, \dots, n$  (nombre de jeux de barres PQ).

La linéarisation des équations (3,46) et (3,47), pour charge une charge de type puissance constant, nous avons :

$$\Delta P_{L_i} = 0 \quad (3.48)$$

$$\Delta Q_{L_i} = 0 \quad (3.49)$$

Pour une charge de type courant constant, les équations (2.46) et (2.47) deviennent :

$$\Delta P_{L_i} = \frac{P_{L_{io}}}{V_{io}} \Delta V_i \quad (3.50)$$

$$\Delta Q_{L_i} = \frac{Q_{L_{io}}}{V_{io}} \Delta V_i \quad (3.51)$$

Pour une charge de type courant constant, les équations (3.46) et (3.47) peuvent être écrites :

$$\Delta P_{L_i} = 2 \frac{P_{L_{io}}}{(V_{io})^2} V_i \Delta V_i \quad (3.52)$$

$$\Delta Q_{L_i} = \frac{Q_{L_{io}}}{(V_{io})^2} V_i \Delta V_i \quad (3.53)$$

Afin d'étudier l'effet de différents types de charge sur la stabilité, ces modèles linéaires de charge donnés par l'équation (3.46) - (3.53) doivent être incorporés dans l'équation du réseau linéaire du modèle dynamique du système multi machine.

### 3.6. Stabilisateur de système de puissance (PSS)

La fonction de base d'un PSS est d'ajouter un correcteur supplémentaire de l'amortissement du rotor du générateur en contrôlant son excitation par un signal de stabilisation de vitesse de la machine. Pour améliorer les oscillations, le PSS doit produire une composante de couple électrique (couple d'amortissement) en phase avec la vitesse du rotor. La figure 3.9 présente un PSS avec une entrée de vitesse ( $\Delta v$ ) et la boucle de couple ( $\Delta T_{PSS}$ ). [23.24]

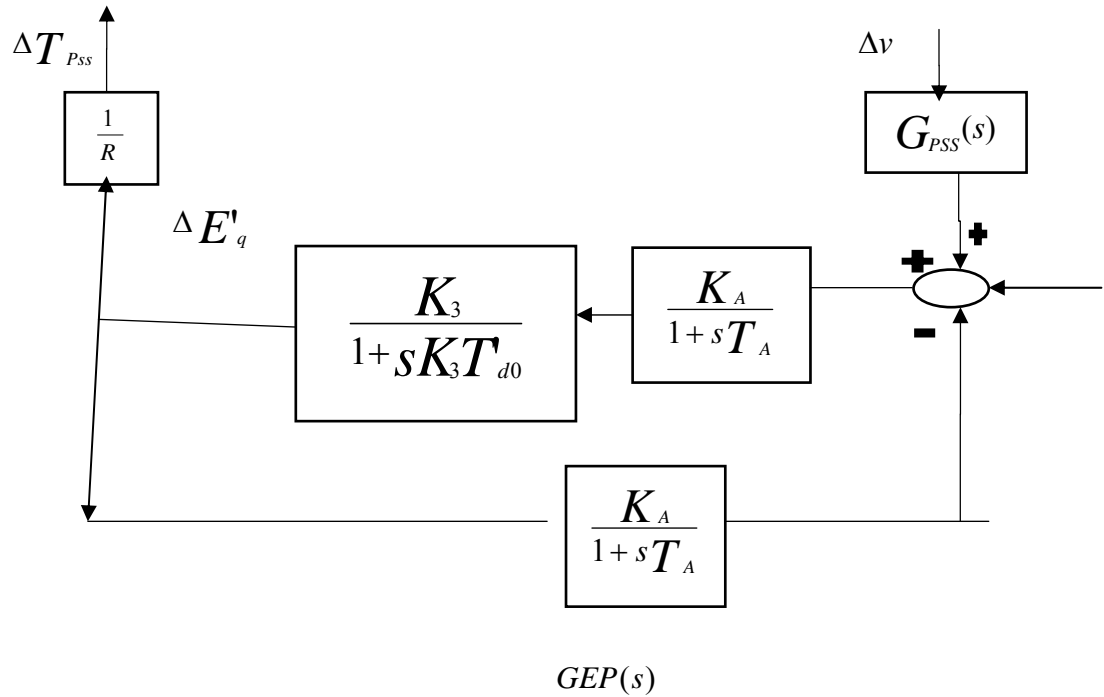


Figure 3.9. PSS avec l'entrée de vitesse

La relation fonctionnelle entre la vitesse du générateur et le couple ( $\Delta T_{PSS}$ ) est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\Delta T_{PSS}}{\Delta v} = GEP(s)G_{PSS}(s) \tag{3.54}$$

Où  $\Delta v = \frac{\Delta \omega}{\omega_s}$  est le signal d'écart de vitesse normalisée. La fonction de transfert GEP (s) représente

les caractéristiques du générateur  $G_T(s)$ , le système d'excitation  $G_A(s)$  et le système électrique.

Par conséquent, la fonction de transfert du PSS, en utilisant la vitesse d'arbre d'entrée qu'elle doit compenser la phase de décalages introduite par le GEP (s) qui est entre l'entrée de l'excitatrice et du couple électrique pour produire une composante de couple en phase avec le changements de la vitesse de façon à accroître l'amortissement des oscillations du rotor. Une caractéristique de stabilisation idéale est inversement proportionnelle à la GEP (s) est donnée l'équation suivante : [25,26]

$$G_{PSS}(s) = \frac{D_{PSS}}{GEP(s)} \tag{3.55}$$

Où  $D_{PSS}$  représente la contribution d'amortissement désirée de signal stabilisant.

Une caractéristique de stabilisation est difficile à réaliser car la compensation parfaite pour les

retards de vitesse exige la différenciation pure avec un gain élevé associé à des fréquences élevées. Un stabilisateur de vitesse pratique doit donc utiliser en avance-retard un gain et le système doit être atténué à des fréquences élevées pour limiter l'impact du bruit et de minimiser l'interaction de torsion avec PSS. Par conséquent, des filtres passe-bas sont nécessaires.

Un PSS pratique est représenté comme suit :

$$G(s) = K_{PSS} \frac{(1 + sT_1)}{(1 + sT_2)} \frac{sT_w}{1 + sT_w} \quad (3.56)$$

La constante de temps  $T_1$  et  $T_2$  doivent être réglés pour fournir l'amortissement sur une gamme de fréquences auxquelles les oscillations sont susceptibles de se produire. Les valeurs typiques de ces paramètres sont les suivants:

$K_{pss}$  (Gain de PSS) : 0.1-50s

$T_1$  (Constante de temps de filtre) : 0.2-1.5 s

$T_2$  (Décalage de constante de temps) : 0.02-0.15s

$T_w$  (Temps de compensation) :  $\approx 10s$

La figure 3.10 représente un PSS pratique à un seul étage connecté avec l'excitatrice. L'équation dynamique du PSS peut être obtenue comme suit :

$$\left( \Delta \dot{V}_s = -\frac{1}{T_2} \Delta V_s + \frac{K_{PSS}}{T_2} \Delta v + \frac{K_{PSS} T_1}{T_2} \Delta \dot{v} \right) \quad (3.57)$$

En cas d'application d'un système multi machine, l'équation (3.57) peut être écrite comme suit :

$$\Delta \dot{V}_{si} = -\frac{1}{T_2} \Delta V_{si} + \frac{K_{PSS}}{T_2} \Delta v_i + \frac{K_{PSS} T_1}{T_2} \Delta \dot{v}_i \quad (3.58)$$

Où  $i$  : numéro de la machine où PSS doit être installé. Comme  $\Delta v_i = \frac{\Delta \omega_i}{\omega_s}$  l'équation (3.58) devient :

$$\Delta \dot{V}_{si} = -\frac{1}{T_2} \Delta V_{si} + \frac{K_{PSS}}{T_2} \frac{\Delta \omega_i}{\omega_s} + \frac{K_{PSS} T_1}{T_2} \frac{\Delta \dot{\omega}_i}{\omega_s} \quad (3.59)$$

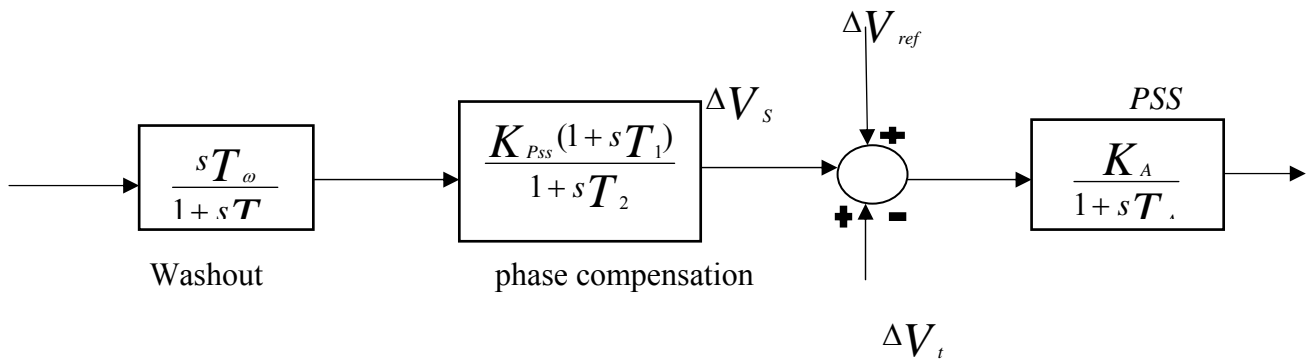


Figure 3.10. Modèle pratique d'un PSS

### 3.7. Intégration de photovoltaïque avec une charge

#### 3.7.1. Présentation du système

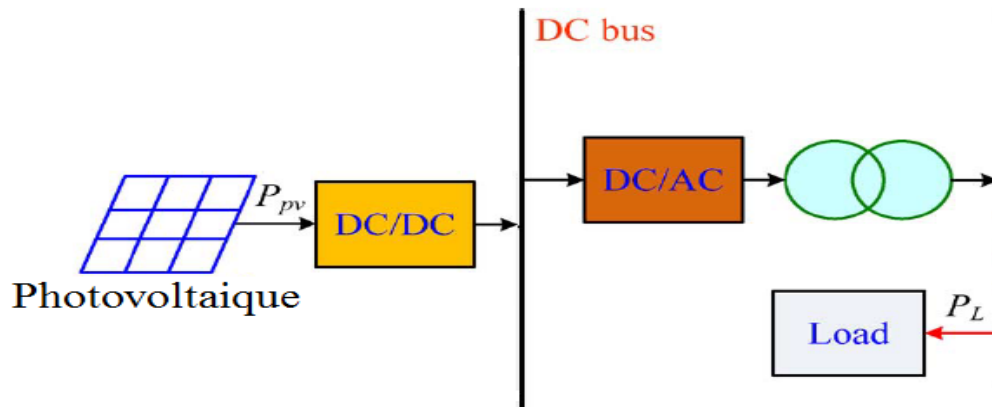


Figure 3.11. Schéma d'intégration de PV avec une charge

Le modèle de simulink est donné par la figure suivante :

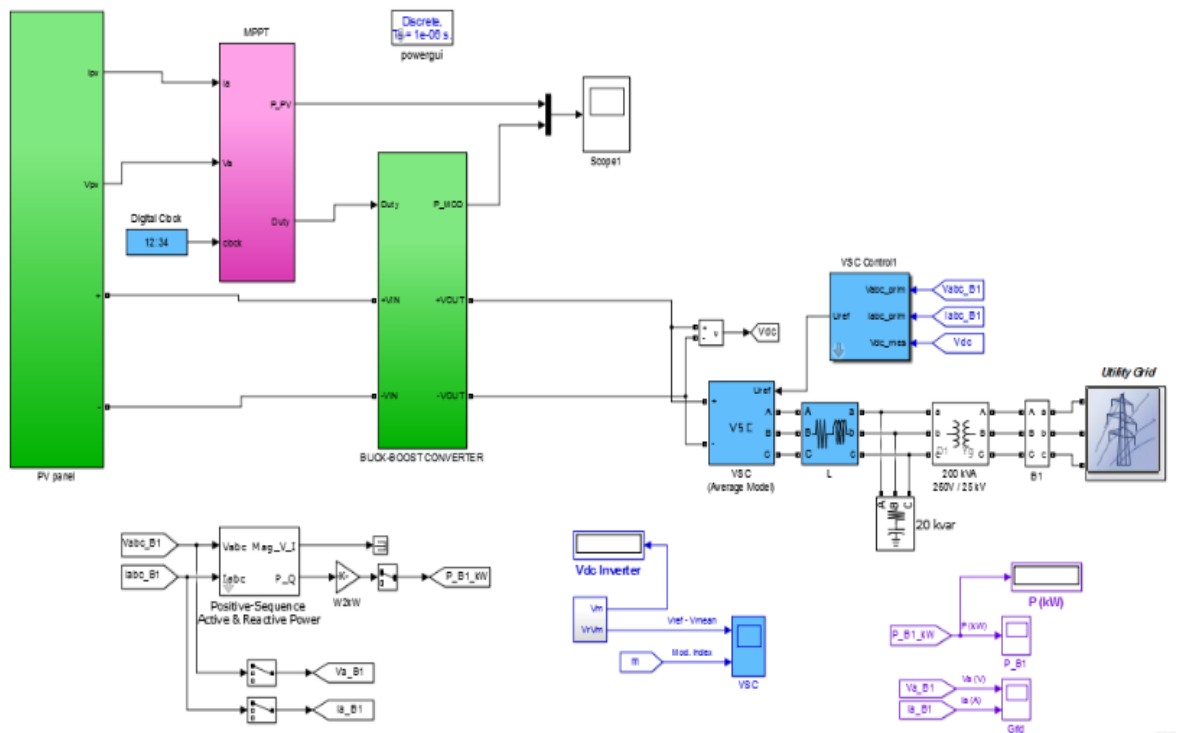
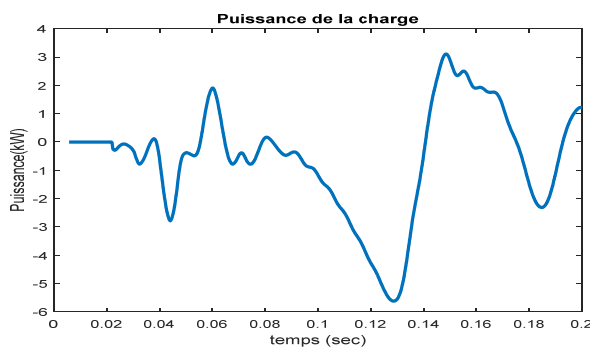
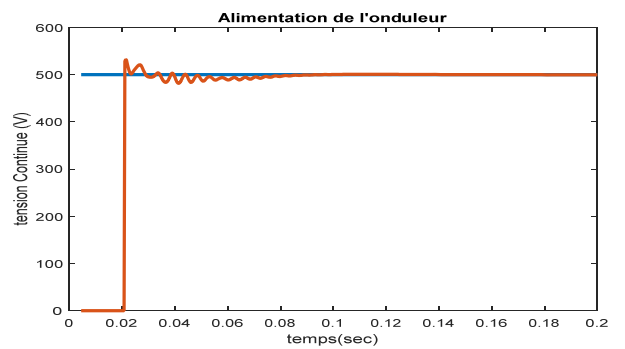


Figure 3.12. Bloc de simulation

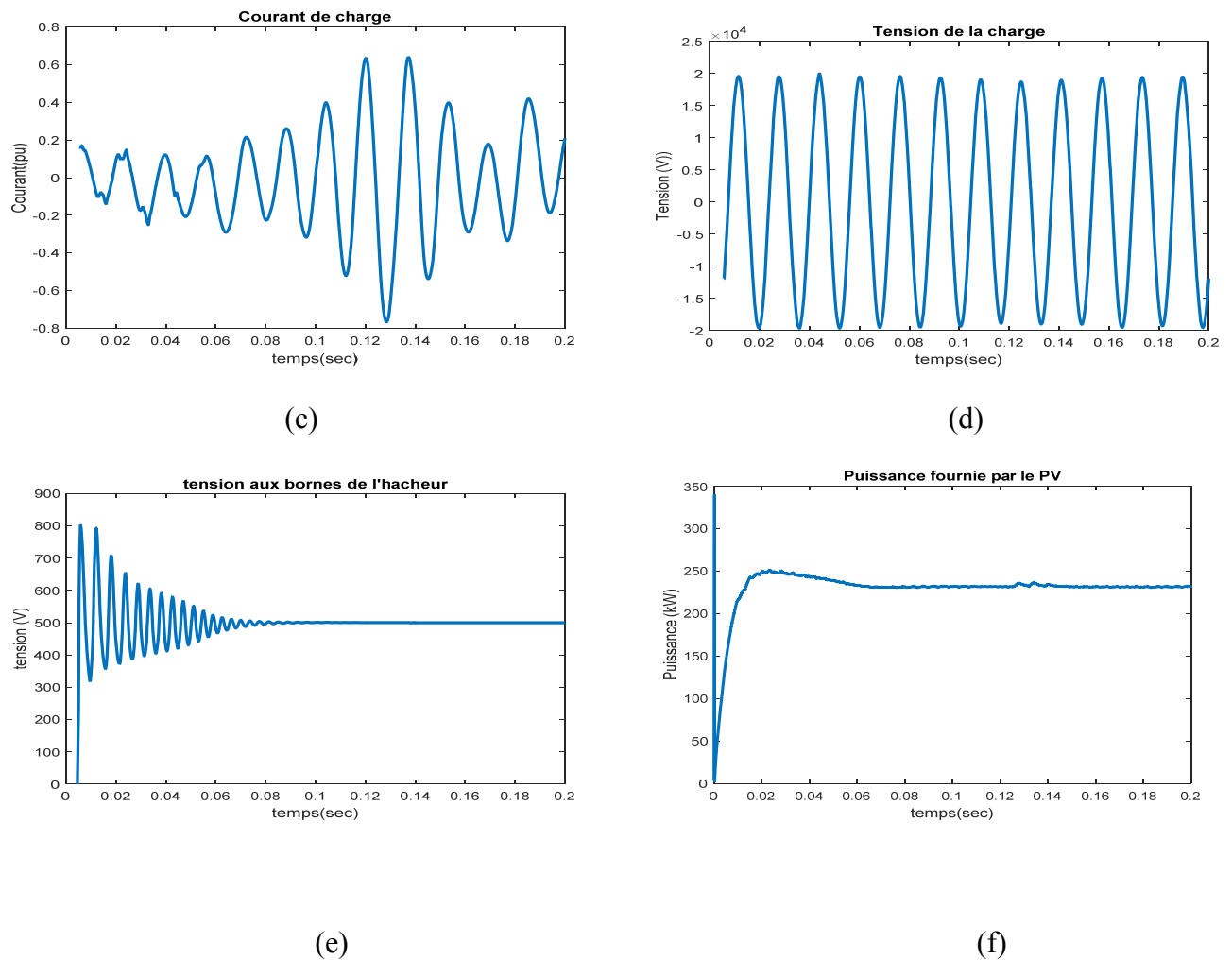
Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes :



(a)



(b)



**Figure 3.13.** (a) :puissance de la charge,(b) :alimentation de l'onduleur,(c) :courant de charge,(d) :tension de charge,(e) :tension aux bornes de l'hacheur,(f) :puissance fournie par le PV.

### 3.7.2. Interprétation des résultats

Les résultats de simulation montrent les performances de notre modèle (PV-Charge), malgré les petites fluctuations rencontrés au début de l'alimentation (entre 0 et 0.08 sec), le système réagit spontanément grâce à la MPPT et revient en stabilité. La tension de sortie est presque parfaite. Nous voyons aussi une apparence de niveaux d'ondulations au niveau du courant de la charge (ça apparaît aussi sur sa puissance), ceci est dû à la nature de la tension du panneau solaire.

### 3.8. Intégration de photovoltaïque avec une machine synchrone

#### 3.8.1. Présentation du système

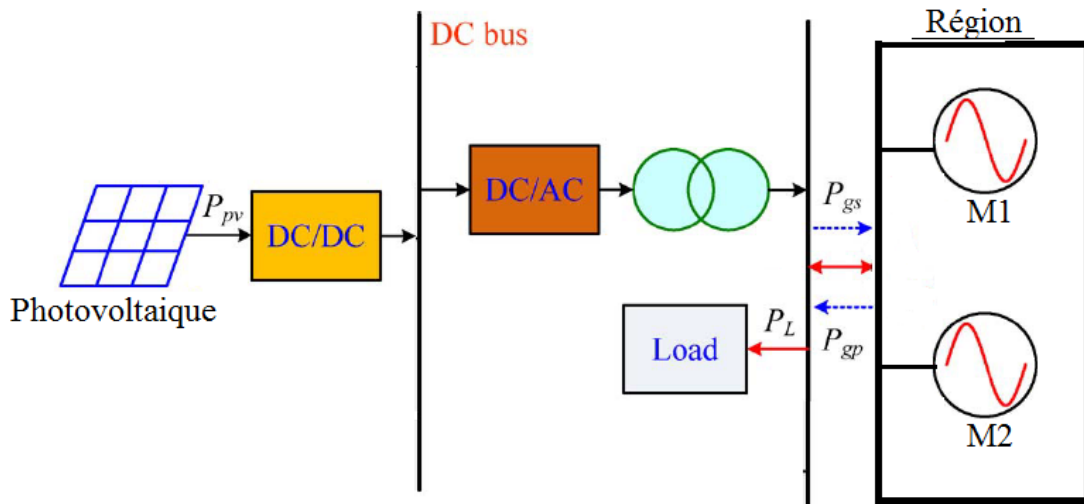


Figure 3.14. Schéma d'intégration PV avec une machine synchrone

Le modèle de simulink est donné par la figure suivante :

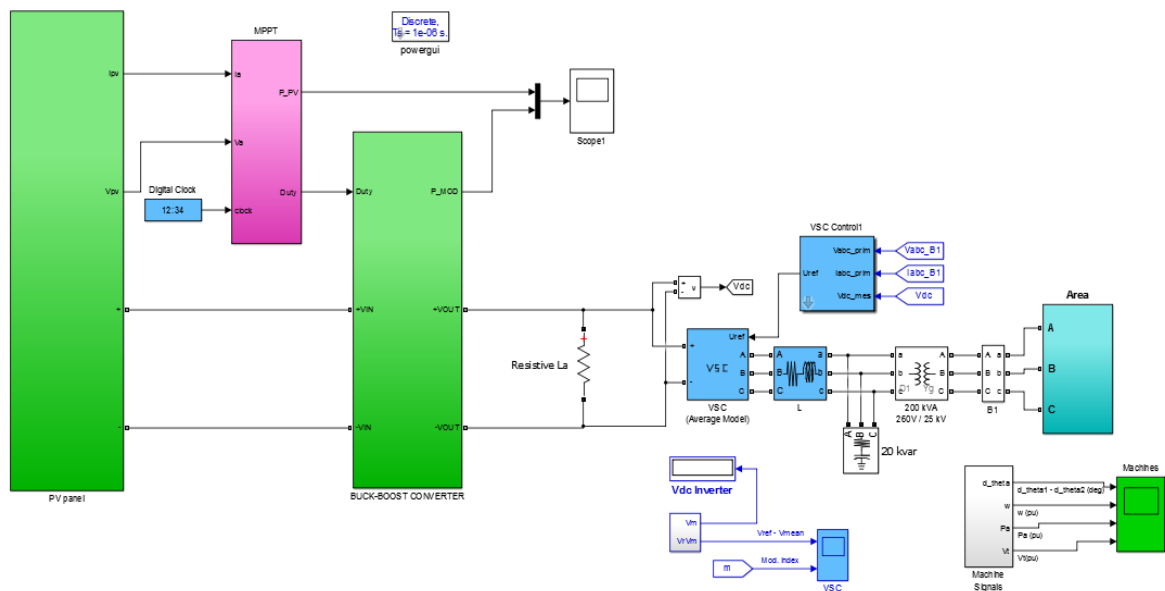


Figure 3.15. Bloc de simulation

Le modèle de la région est présenté par la figure suivante :

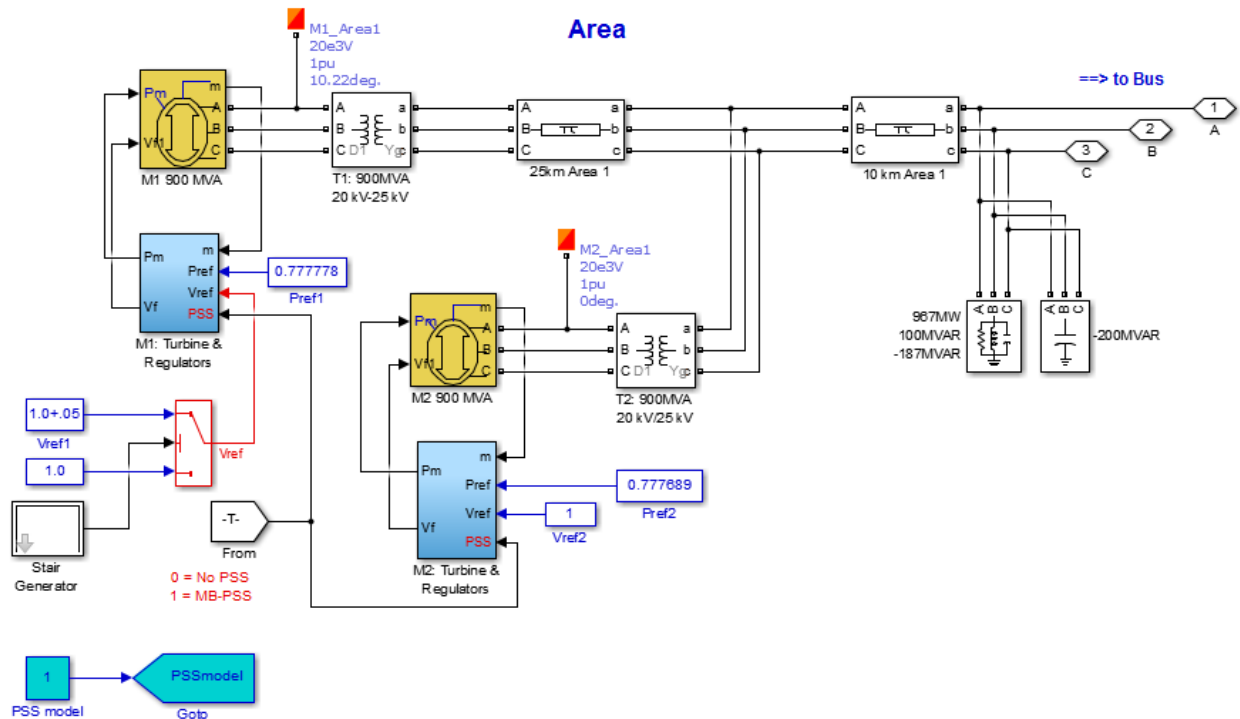
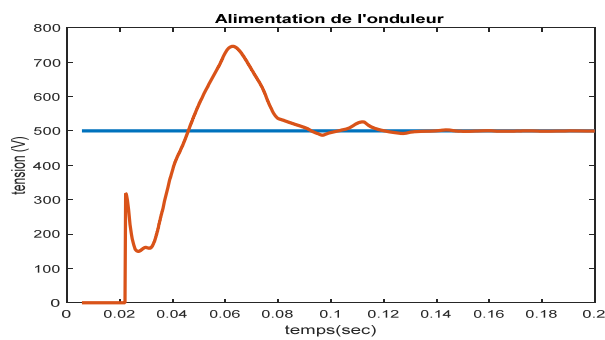
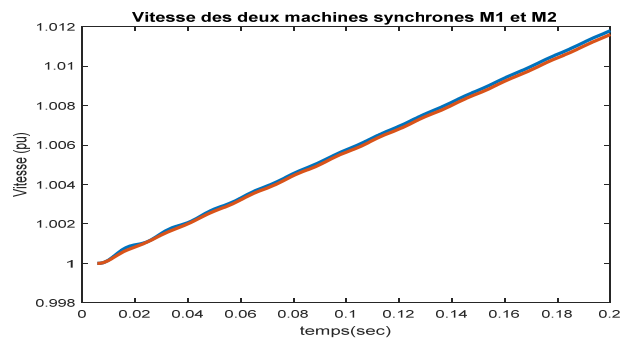


Figure 3.16. Modèle de la région (Machine)

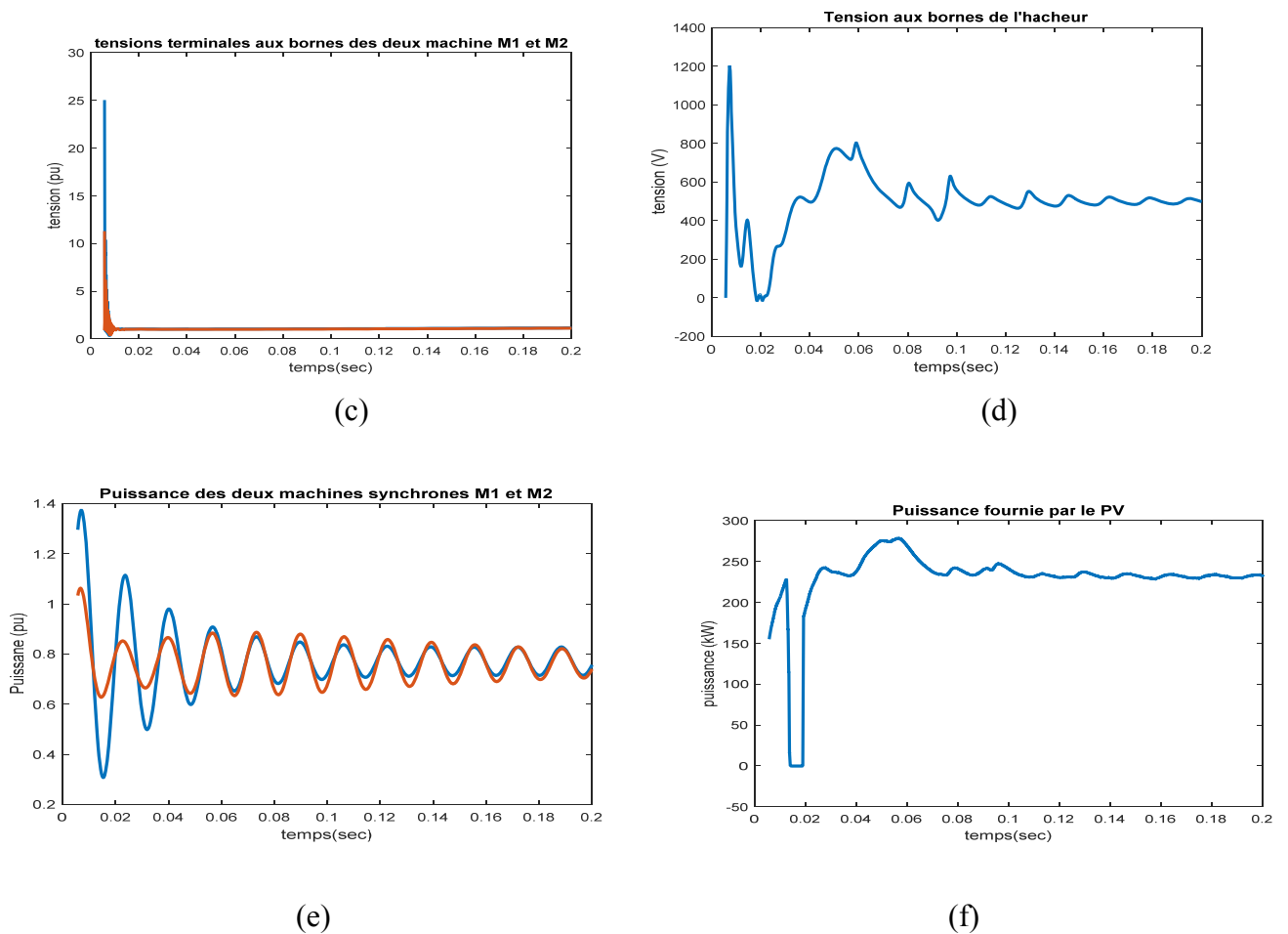
Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes :



(a)



(b)



**Figure 3.17.** (a) :vitesses des deux machines synchrones,(b) :alimentation de l'onduleur,(c) :tensions terminales aux bornes des deuxx machines,(d) :puissance fournie par le PV,(e) :puissance des deux machines synchrones,(f) :tension aux bornes de l'hacheur.

### 3.8.2. Interprétation des résultats

Les résultats obtenues montrent qu'il y a une synchronisation presque parfaite entre les vitesses des deux machines synchrones malgré qu'ils ont été relié au système PV. En effet l'introduction de notre bloc PV dans le système global constitué par des machines synchrones a provoqué un déstabilisation ( entre 0 et 0,12 s) mais la vitesse de réaction était bonne. On remarque aussi qu'il existe des fluctuations au niveau de la tension de sortie du notre générateur PV dû à l'introduction des machines. Globalement la puissance du système était garantie au début par les machines synchrones puis il y'a eu une amélioration grace à l'introduction du générateur PV (voir figure 3.17).

### **3.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un réseau d'énergie électrique pour intégrer un site photovoltaïque dans le réseau électrique. Dans un premier temps, on a décrit les différentes parties constituant un réseau et les équations mathématiques qui permettent de les modéliser, ensuite nous avons simulé le comportement de réseau face à l'intégration de photovoltaïque.

## Chapitre 04

# APPLICATION SUR UN MICRO-RESEAU

### 4.1. Introduction

Un micro-réseau est un ensemble local de consommateur et petite producteur d'énergie électrique, qui peut fonctionner en régime connecté au réseau de distribution ou en autonomie et du point de vue de l'opérateur du réseau. Il agit comme une seule unité en tant que producteur ou consommateur d'électricité. Ceci est réalisable à l'aide d'une supervision intelligente intégrée dans le micro-réseau. Le concept de micro-réseau seul ou en interaction avec d'autres micro-réseaux ou le réseau de distribution fait partie du réseau intelligent. L'électrification de la zone éloigné ou rurale est l'une des principales préoccupations, en particulier dans les pays en développement. [27] Ce chapitre présente une étude de différentes énergies pour une micro grid autonome dans une zone éloignée.

### 4.2. Description du réseau

La figure 4.1 présente un micro-réseau qui comporte un réseau classique et quatre types d'énergie renouvelables. [28]

Dans ce micro grid, l'énergie conventionnelle est considérée comme la principale source d'énergie. . En outre, un système solaire photovoltaïque, un système éolien, un système à pile à combustible et groupe diesel sont installés afin d'éviter tout manque d'énergie et d'améliorer la fiabilité de la charge.

Compte tenu de la contrainte d'équilibre de puissance entre la production et la consommation d'énergie totale, donnée par la figure suivante :

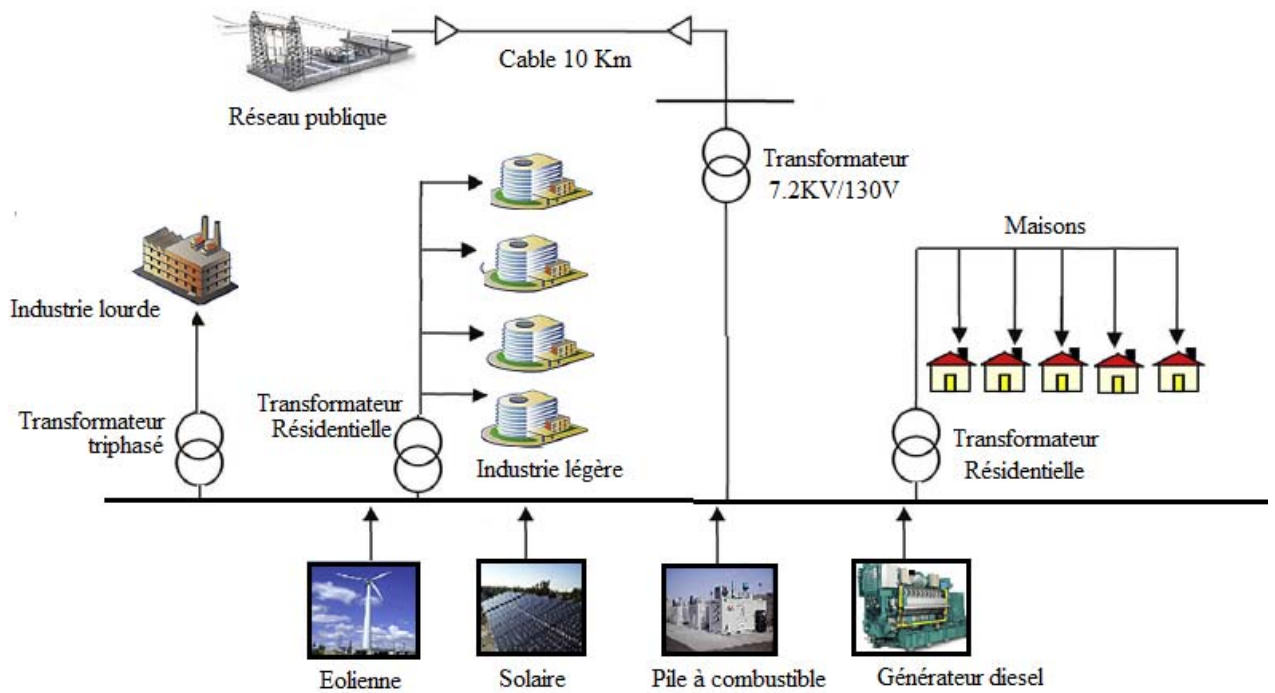


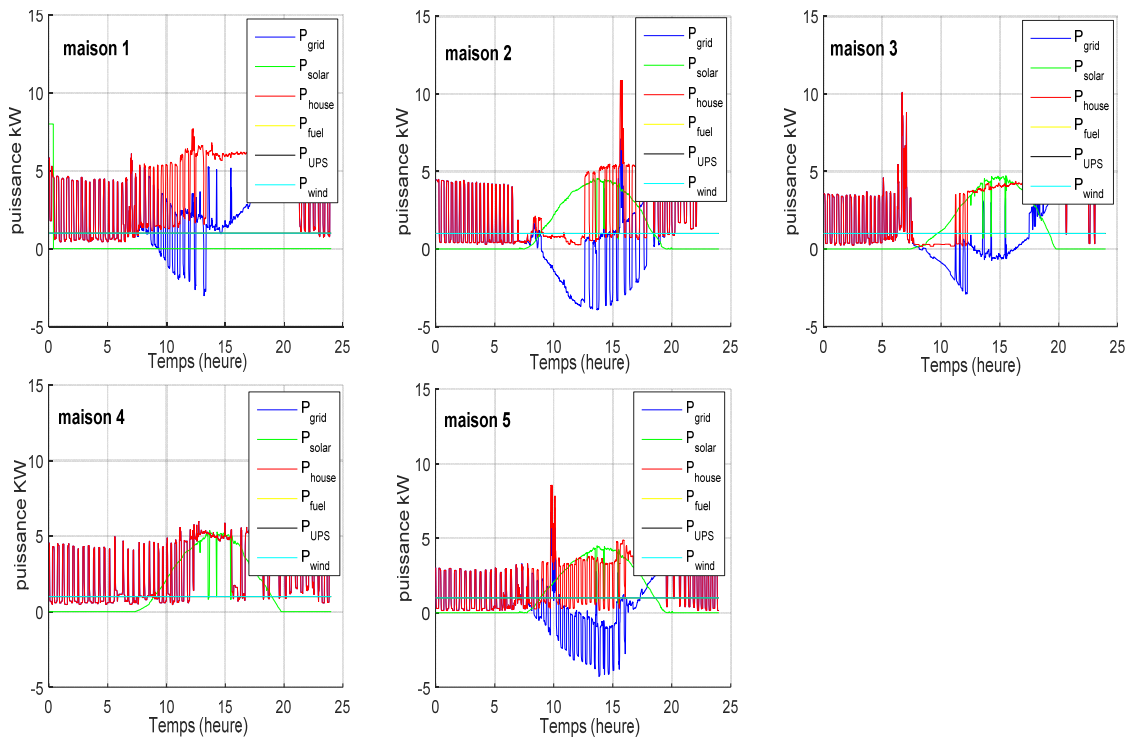
Figure 4.1. Système de test [28]

Les bilans de puissance concernant les cinq maisons, l'industrie lourde et quatre industries légères sont donnés de la façon suivante tableau 4.1. Pour chaque minute, il y a des données pendant 24 heures. On prend comme exemple la maison 1.

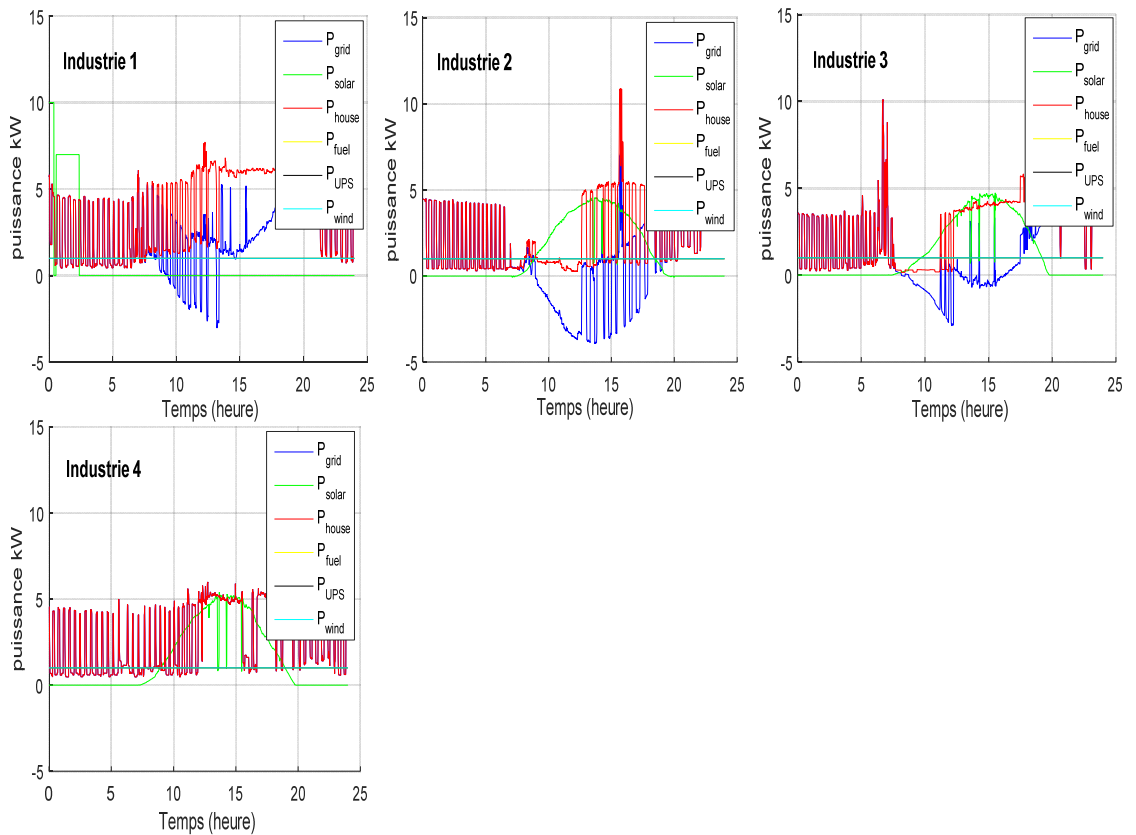
Tableau.4.1. Bilan de puissance de la maison1.

	Utilisation (KW)	Génération (KW)	Puissance réseau (KW)	Solaire (KW)	Pile à combustible (KW)	Générateur diesel (KW)	Eolienne (KW)
23 :59 :00	5.753233333	0	5.7535	8	1	1	1
0 :00 :00	5.72795	0	5.72795	8	1	1	1
0 :01 :00	5.833433333	0	5.833433333	8	1	1	1
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
12 :00 :00	6.15605	4.002216667	2.153833333	0	1	1	1
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
23 :59 :00	4.964583333	0	4.964583333	0	1	1	1

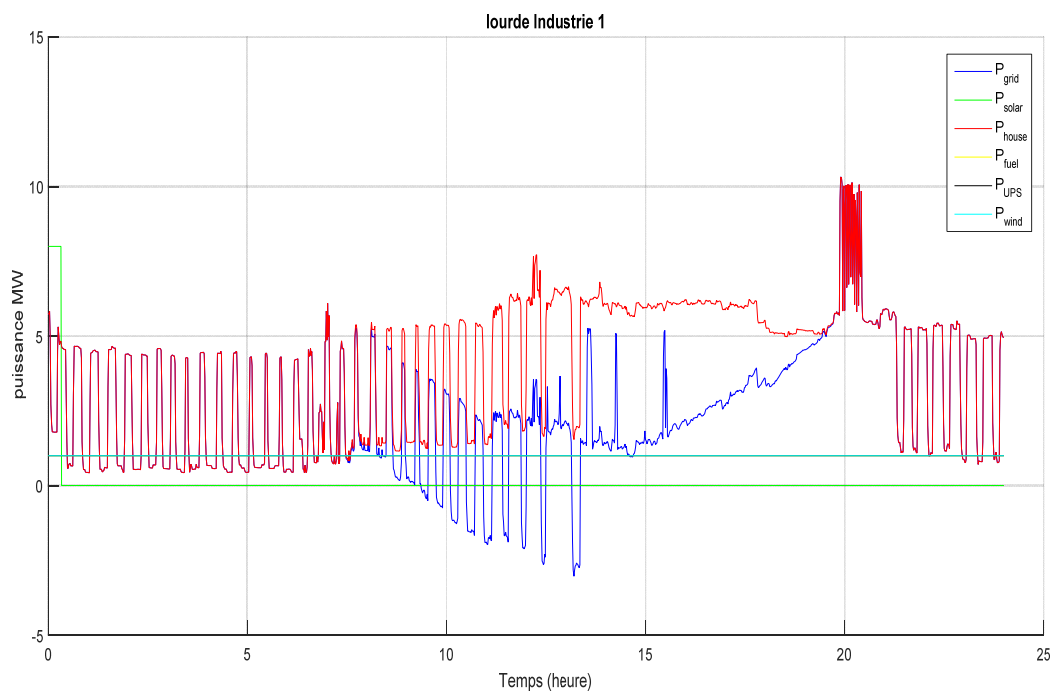
Après avoir saisi tous les données, on trouve les figures suivantes.



**Figure 4.2.** Bilan de puissance des cinq (05) maisons



**Figure 4.3.** Bilan de puissance des quatre (04) industries



**Figure 4.4.** Bilan de puissance de grande industrie

### 4.3. Simulation

#### 4.3.1. Schéma de simulink

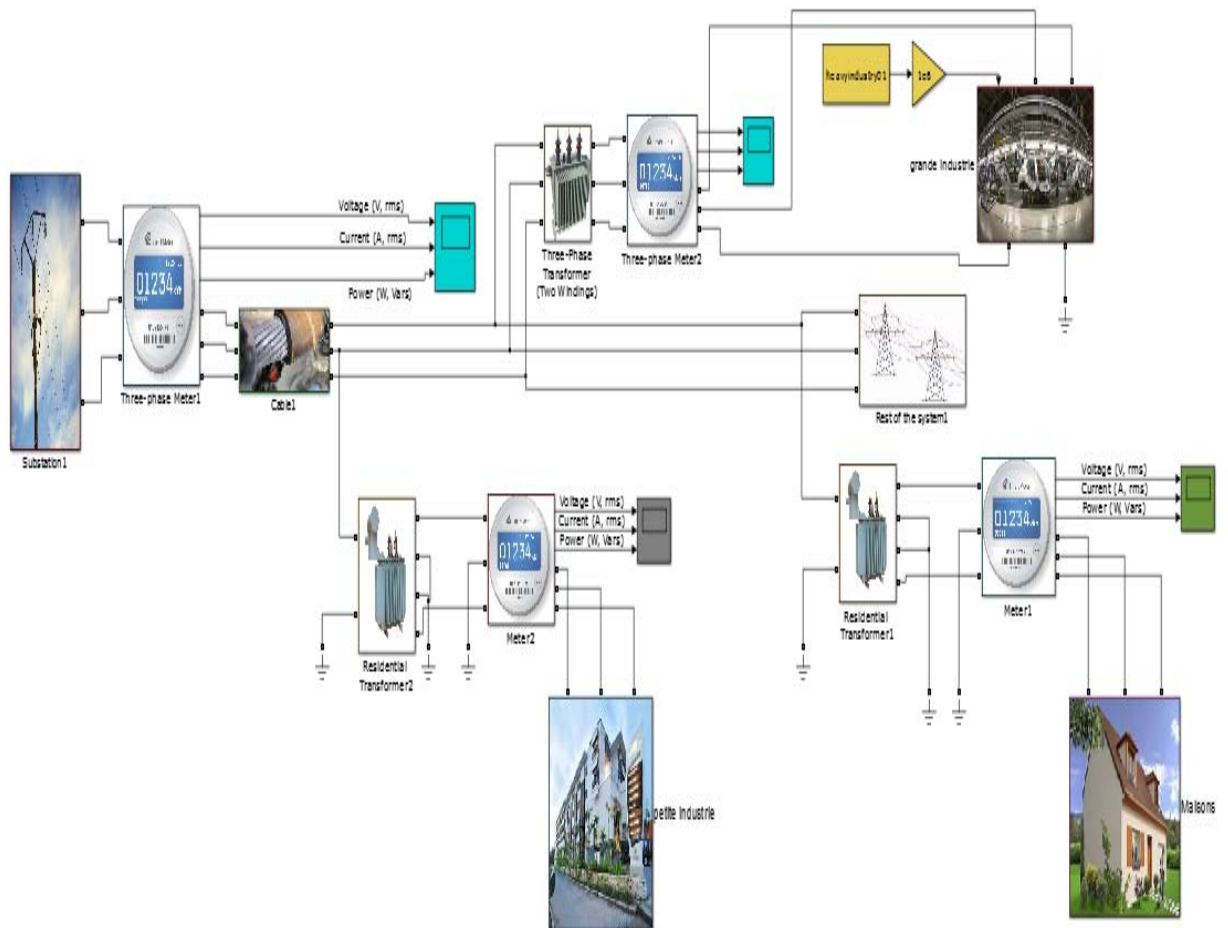


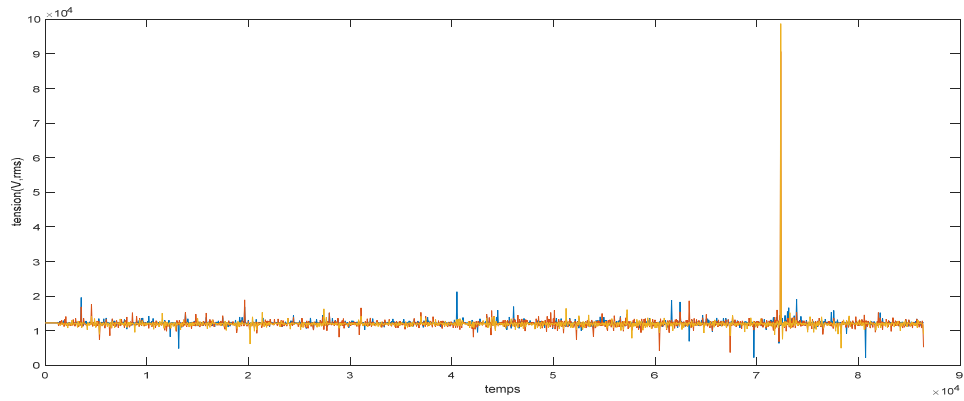
Figure 4.5. Block de simulation

#### 4.3.2. Résultats de simulation

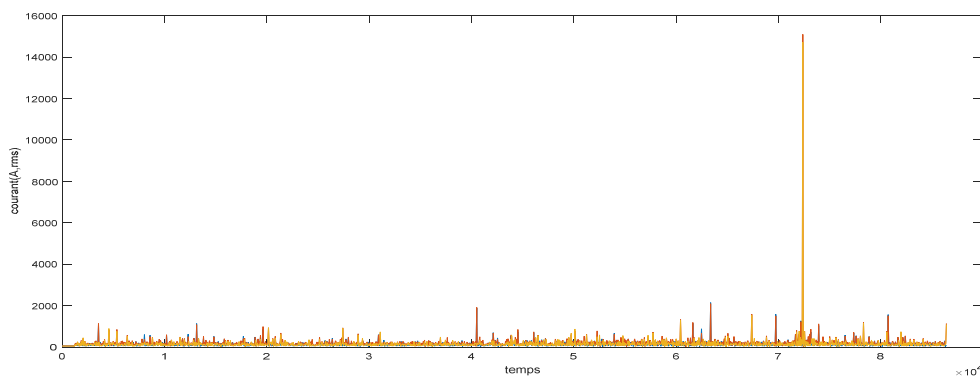
Les résultats de simulation sont illustrés par les figures suivantes en tenant compte deux modes, 24heures et 12heures.

### 4.3.2.1. Résultats pour 24 heures

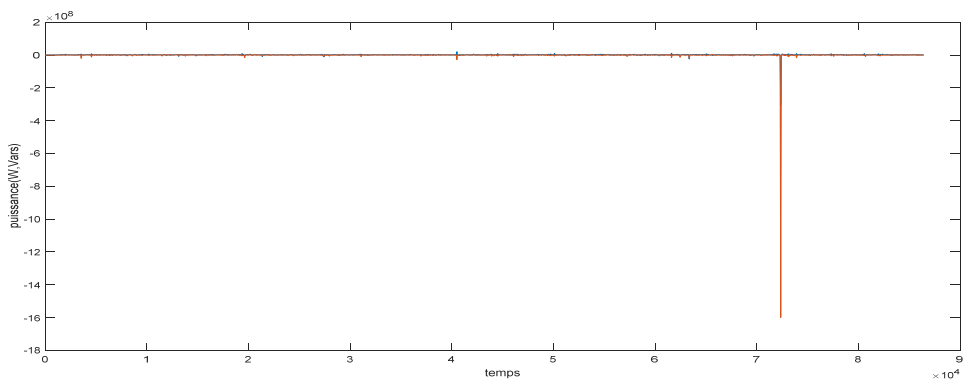
La source :



(a)



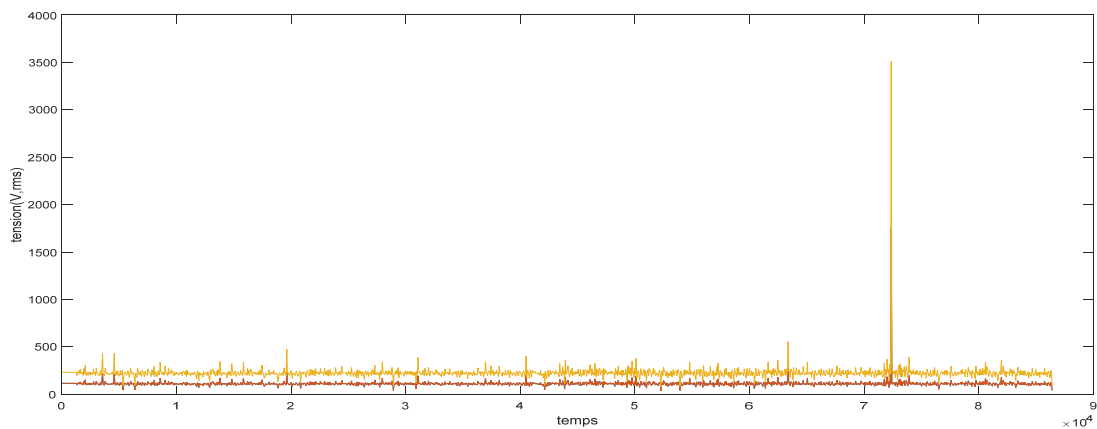
(b)



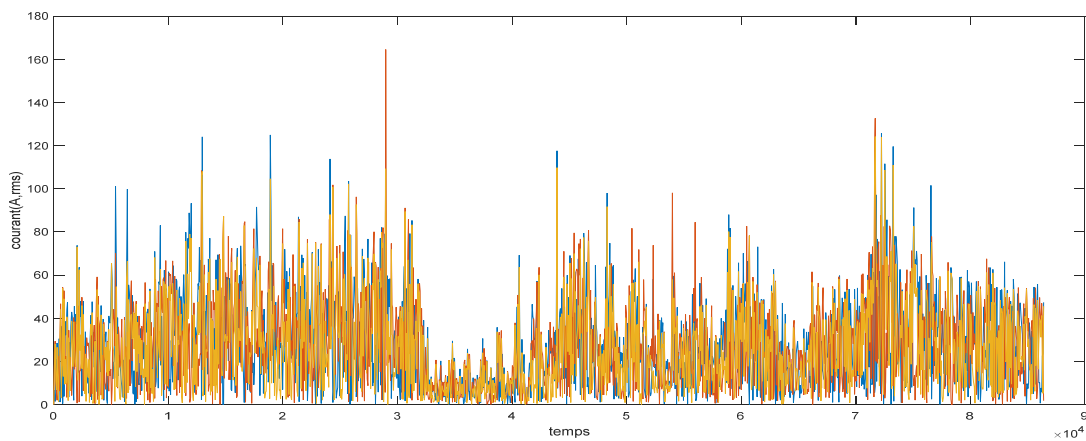
(c)

Figure 4.6.(a) La tension, (b) le courant,(c) la puissance de source pour 24 heures

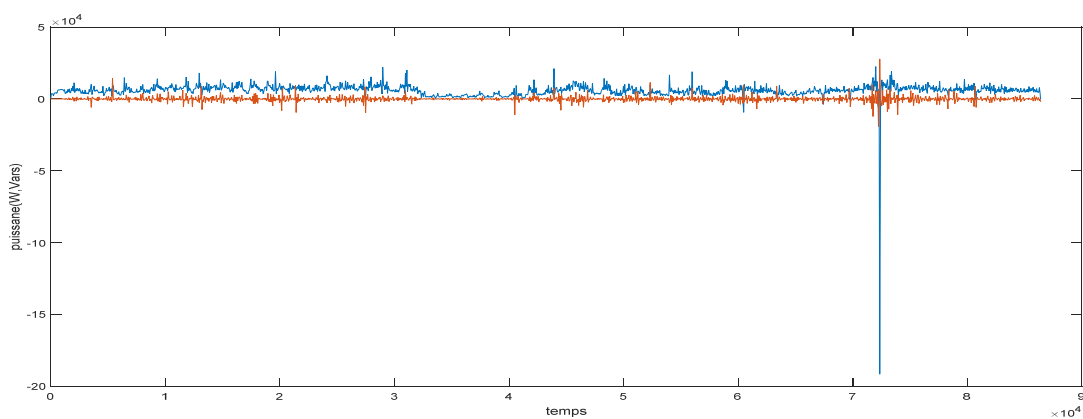
**Les Industries :**



**(a)**

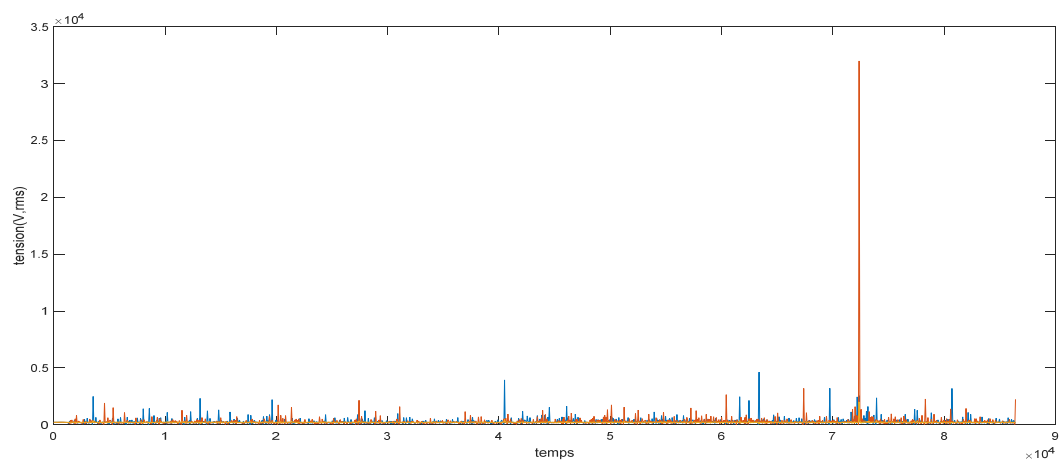
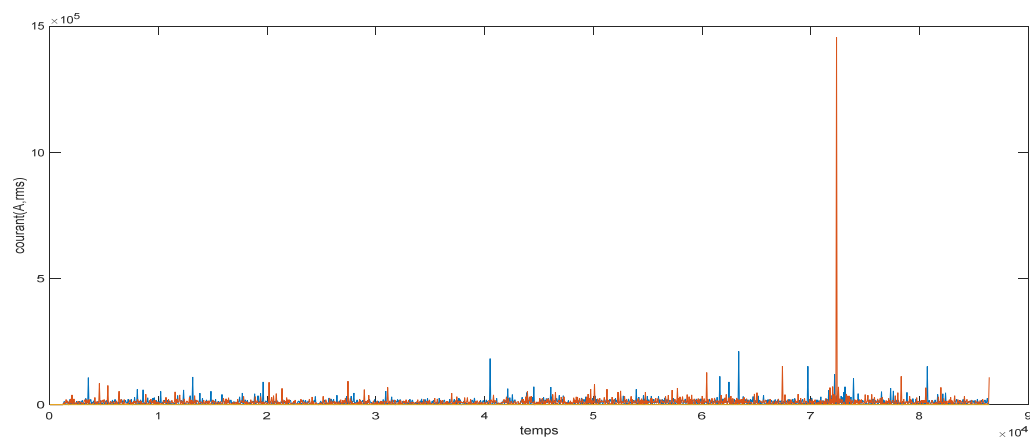
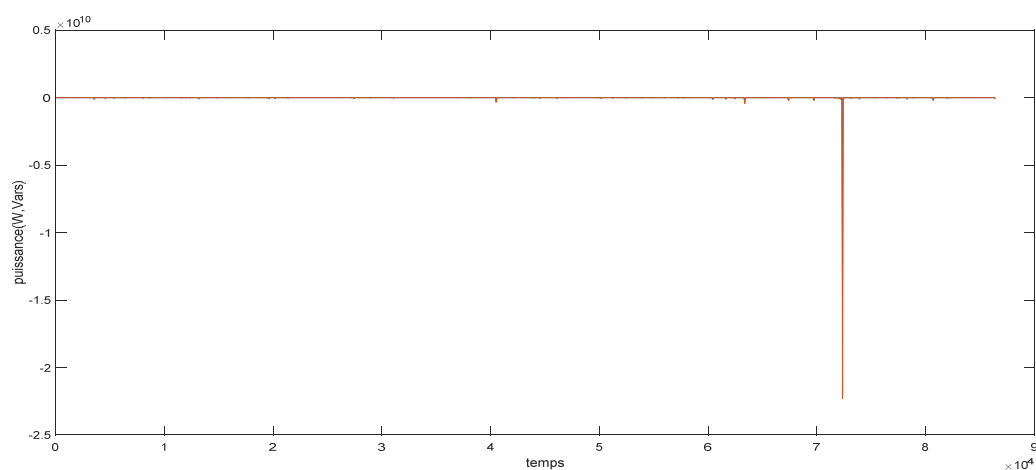


**(b)**



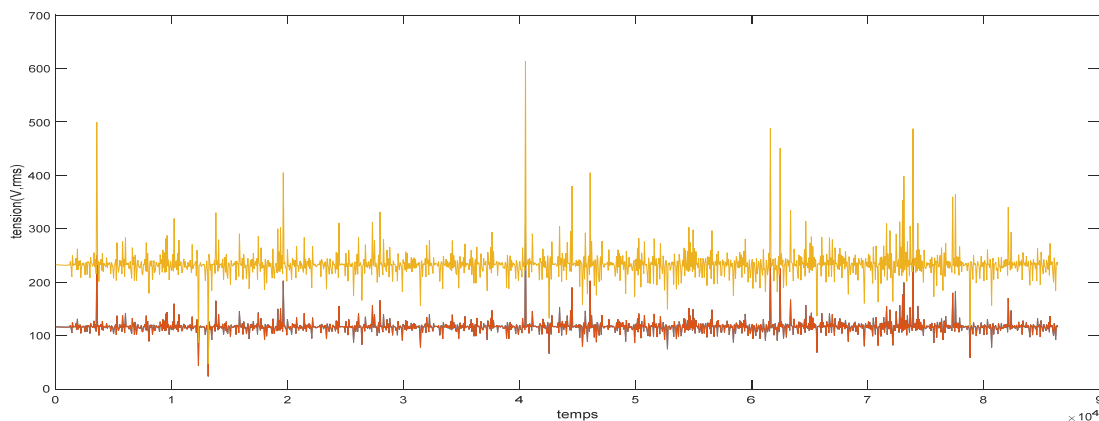
**(c)**

**Figure 4.7.** (a) La tension, (b) le courant,(c) la puissance d'industries pour 24 heures

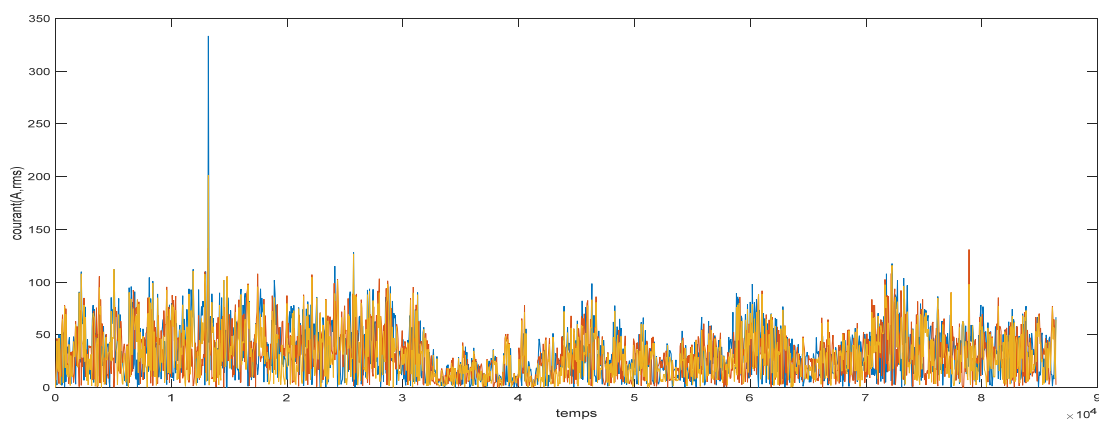
**Industrie lourde :****(a)****(b)****(c)**

**Figure 4.8.** (a) La tension, (b) le courant, (c) la puissance d'industrie lourde pour 24 heures

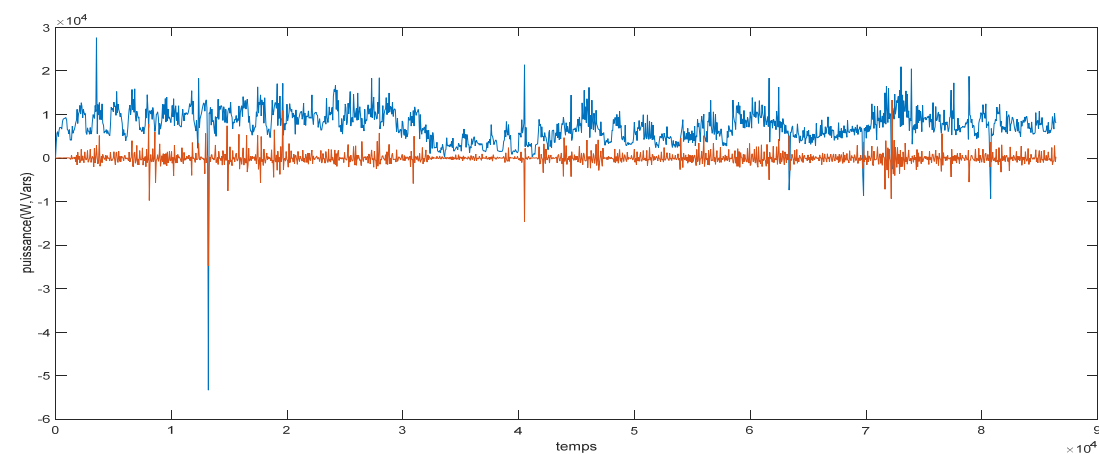
**Les maisons :**



**(a)**



**(b)**

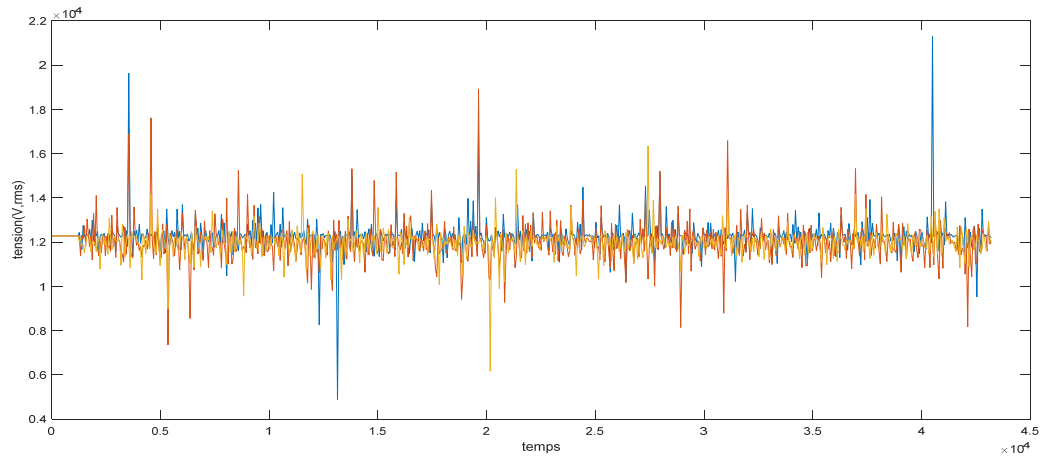


**(c)**

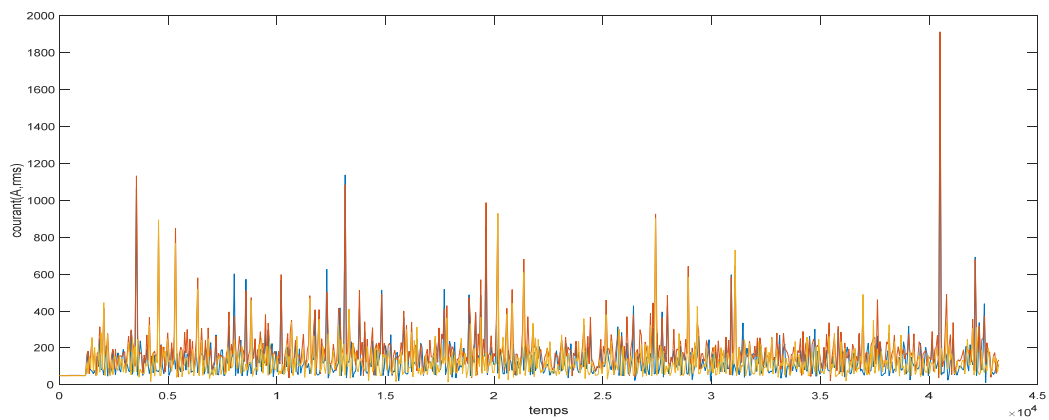
**Figure 4.9. (a) La tension, (b) le courant,(c) la puissance des maisons pour 24 heures**

### 4.3.2.2. Résultats pour 12 heures

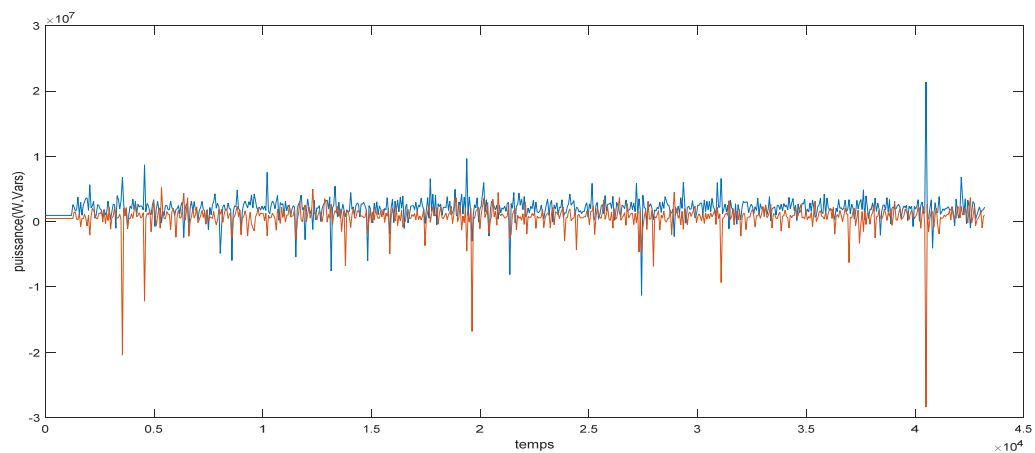
La source :



(a)



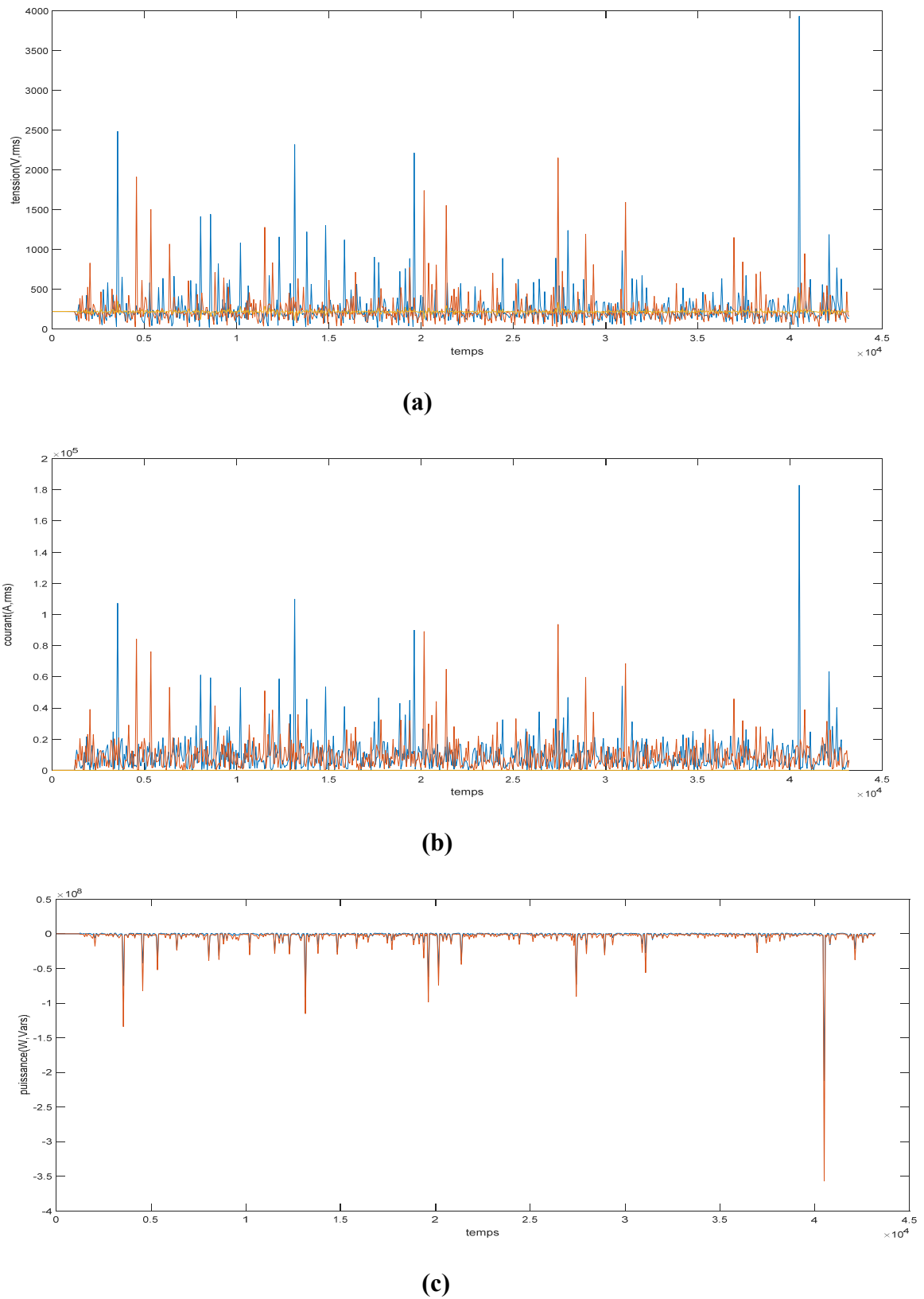
(b)



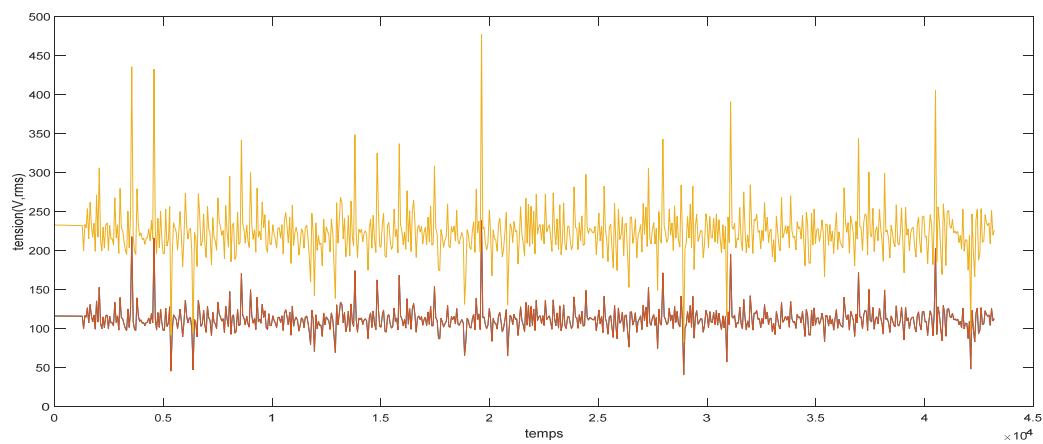
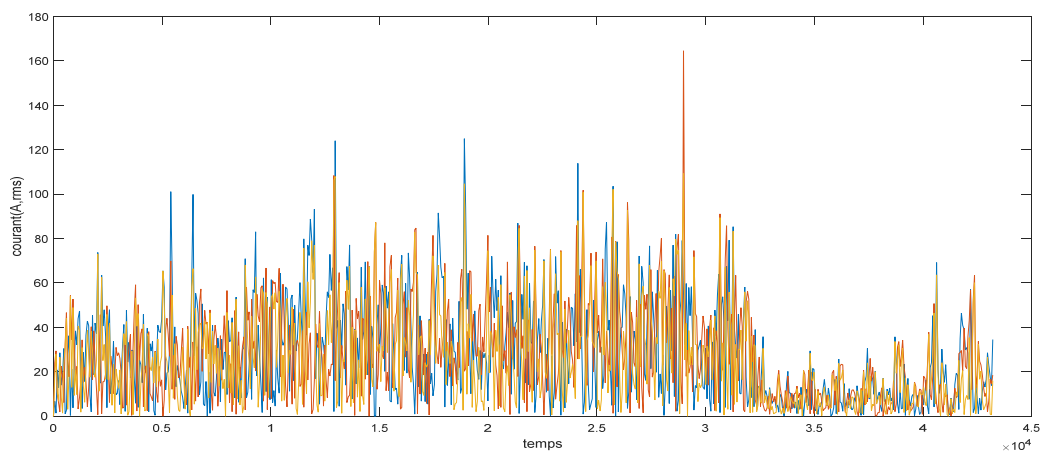
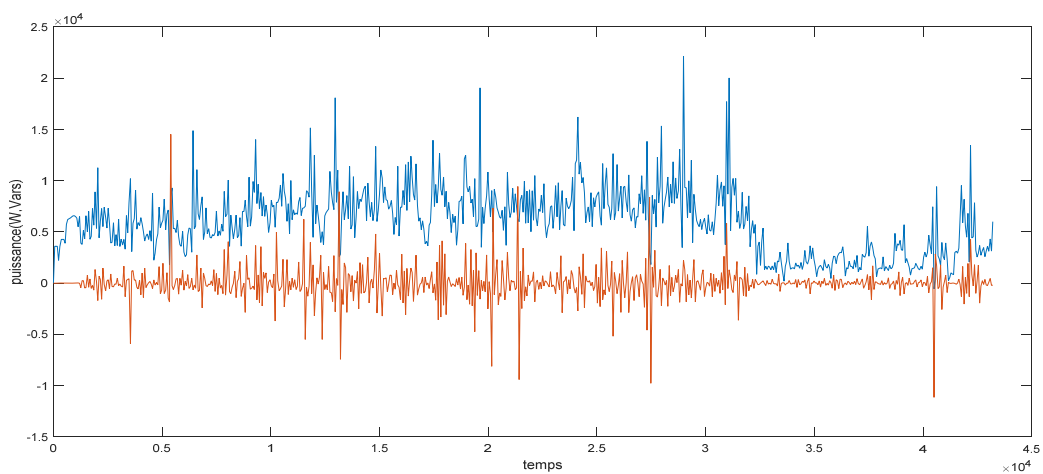
(c)

Figure 4.10. (a) La tension, (b) le courant, (c) la puissance de source pour 12 heures

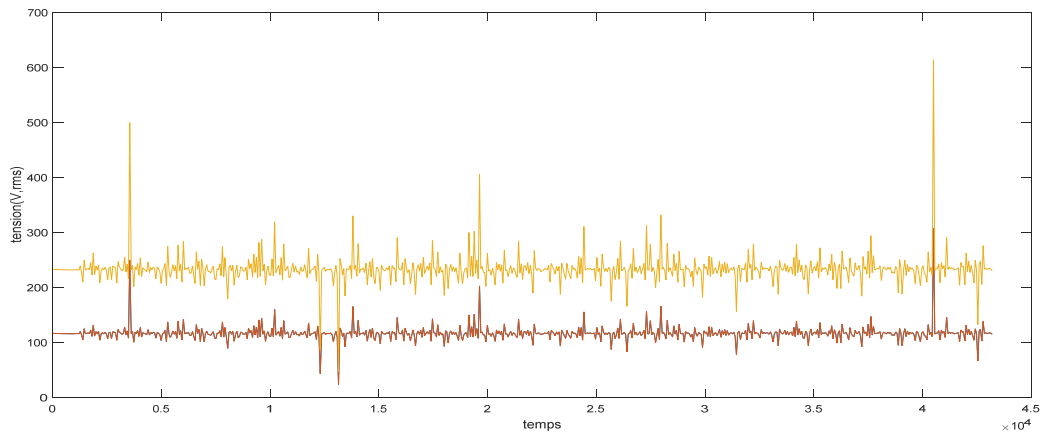
**Les Industries :**



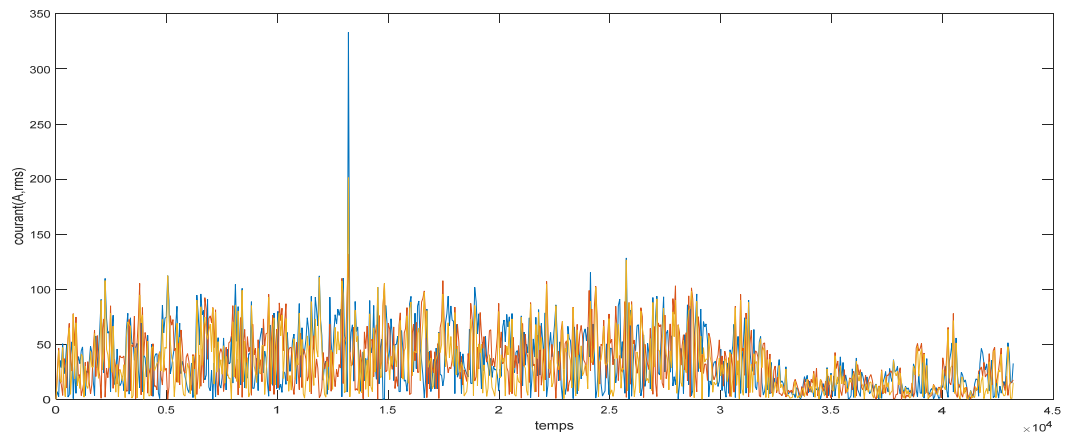
**Figure 4.11.** (a) La tension, (b) le courant,(c) la puissance d’industries pour 12 heures

**Industrie lourde:****(a)****(b)****(c)****Figure 4.12. (a) La tension, (b) le courant, (c) la puissance d'industrie lourde pour 12 heures**

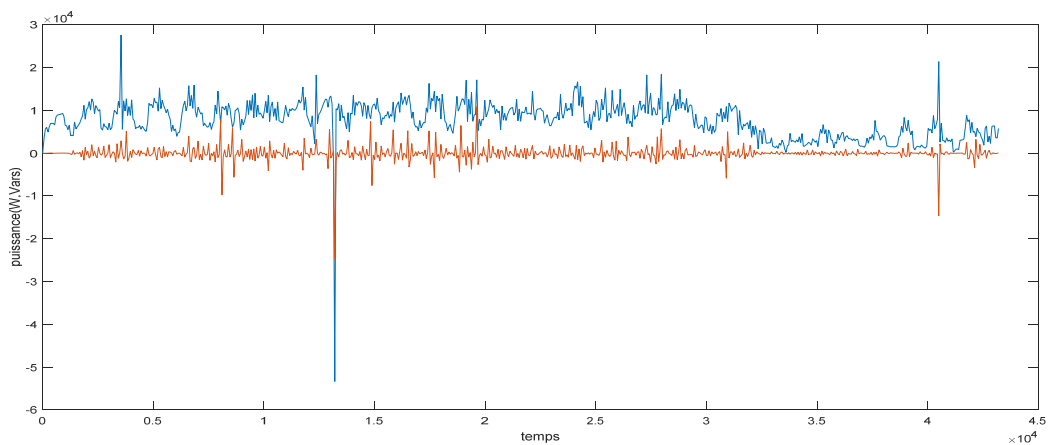
**Les maisons :**



**(a)**



**(b)**



**(c)**

**Figure 4.13. (a) La tension, (b) le courant, (c) la puissance des maisons pour 12 heures**

#### 4.3.2.3. **Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus confirment l'importance des smart grid (cas d'un micro réseau) dans l'optimisation de l'utilisation d'énergie. L'introduction des compteurs intelligents (dans notre cas quatre compteurs, voir schéma simulink) permet d'adapter la production de l'énergie selon la demande, ils permettent aussi d'alerter le fournisseur (la production) et l'utilisateur (la consommation) en cas d'une augmentation de consommation ce que permettra d'augmenter la production et maintenir le bon fonctionnement du réseau, et cela peut être appliqué dans l'industrie tout comme dans l'utilisation domestique

#### 4.4. **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait une application sur un micro-réseau qui comporte un réseau classique et quatre types d'énergie renouvelables. Dans un premier temps, on a donné les bilans de puissance pour cinq maisons, l'industrie lourde et quatre industries légères pour chaque minute pendant 24 heures. Ensuite nous avons fait la simulation pour ce micro-réseau avec trois essais (24h ,12h ).

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

---

Dans ce travail, nous avons présenté les réseaux électriques (réseau classique et intelligent), puis on a fait une comparaison entre ces deux réseaux. On a présenté aussi les énergies renouvelables et on s'est concentré sur l'étude du photovoltaïque de point de vue caractéristiques et effet des conditions atmosphériques (éclairage et température).

Le Photovoltaïque peut se raccorder au réseau par deux structures qui sont :

- Structure avec hacheur et onduleur.
- Structure avec une connexion directe.

Comme il peut s'intégrer au réseau électrique avec une charge ou avec une machine synchrone. On a vu les deux types d'intégration avec les performances résultantes ainsi que les deux types de raccordement.

Nous avons effectué dans le chapitre 04 (dernier chapitre) une simulation d'un micro réseau qui comporte un réseau classique et quatre types d'énergies renouvelables. Ce dernier chapitre étant très important et présente beaucoup des nouveautés pour nous. C'est pour cela qu'on a vu que la partie design c'est-à-dire conception et la partie communication intelligente.

Comme perspectives, on envisage d'introduire toujours dans les micros réseaux Smart grid :

- Etude de l'aspect distribution d'énergie.
- Calculs énergétiques et rendement de ces réseaux.
- Les villes intelligentes.

Voilà quelque idée qui peuvent enrichir ce travail et qui constituent un schéma directeur pour sa continuité. En effet, ce projet relève d'une importance totale pour notre pays qui cherche à réduire les coûts de sa consommation énergétique, ces coûts sont devenus de plus en plus gênant dans la comptabilité du pays.



## Annexe A.

### Annexe A. Paramètres du réseau à 02 générateurs

#### Paramètres des générateurs :

$P_N = 900$ MVA	$V_N = 20$ kV	$f_N = 60$ Hz	$X_d = 1.8$
$X_d' = 0.3$	$X_d'' = 0.25$	$X_q = 1.7$	$X_q' = 0.55$
$X_q'' = 0.25$	$X_L = 0.2$	$T_{do}' = 8$ s	$T_{do}'' = 0.03$ s
$T_{qo}' = 0.4$ s	$T_{qo}'' = 0.05$ s	$R_S = 0.0025$	Paires de pôles = 4

H = 6.5 s pour G1 et G2.

#### Paramètres des transformateurs :

$S_B = 900$ MVA	20/25kV	f = 60 Hz	$R_1 = 1e-6$	$R_2 = 1e-6$
$L_1 = 0$	$L_2 = 0.15$	$D_1/Y_g$	$R_m = 500$	$L_m = 500$

#### Paramètres des lignes de transport :

3 Phases	60 Hz	
$L_1 = 1.4032e-3$ H/km	$R_1 = 0.0592$ $\Omega/km$	$R_0 = 1.61$ $\Omega/km$
$L_0 = 0.0061$ H/km	$C_1 = 8.775e-9$ F/km	$C_0 = 5.2489e-9$ F/km



---

## Références Bibliographiques

---

- [1] AURELIEN Mercier « Pilotage de la production décentralisée et des charges non conventionnelles dans le contexte Smart Grid et simulation hybride temps réel » THÈSE DOCTORAT l'université Grenoble Alpes septembre 2015.
- [2] DERRADJ Lounis « Généralité sur les réseaux électriques » mémoire.
- [3] BEMANA NGUEOUELE Yannick « Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public » institut international d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Mémoire Master 2012.
- [4] LIVRE BLANC Des industriels au service de l'intelligence énergétique rédigé par le Gimélec version-finale-2011-00768-01-E1.
- [5] Généralités sur les réseaux électriques (cours)
- [6] Sybil bartelmaos « Adaptation des Smart grids pour une meilleure intégration des énergies renouvelables » mémoire Ingénieur ; université libanaise 2013.
- [7] Hristiyan KANCHEV « Gestion des flux énergétique dans un system hybride de source d'énergie renouvelable : optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro-réseau électrique urbain » thèse doctorat école centrale de LILLE, 2014
- [8] Ilyes TEGANI « Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des super condensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque » Université Mohamed Khider – Biskra Thèse doctorat LMD 2016.
- [9] Etude économique à long terme pour la mise en place de compteurs intelligents dans les réseaux électriques et gaziers au Luxembourg Rapport final 28 février 2011 Version 1.1. Préparé pour : le Ministère de l'Économie et du Commerce Extérieur du Luxembourg. Préparé par : Pol-Hervé Floch, Hervé Schwartz - Schwartz and Co S.A.
- [10] Adel Ghouari « Étude théorique et expérimentale des réseaux intelligents appliqués dans la gestion d'énergie des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique » THÈSE DOCTORAT, Université de Batna (05 /2017).

- [11] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=definition-smart-grids> consulté le 27 février 2017,15h42
- [12] Hassini née Belghitri Houda, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » université Abou-Bakr belkaid De Tlemcen, 2010.
- [13] Association des entreprises électriques suisses « Document connaissances de base » état : janvier 2016.
- [14] Othmane Benseddik et Fathi Djalou, « étude et optimisation de fonctionnement d'un système photovoltaïque », université Kasdi Merbah – Ourgla, 27/06/2012.
- [15] thèse doctorat « contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » présentée par salim abouda l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax 2015.
- [16] MOHAMED ARROUF « optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branchée sur un générateur photovoltaïque » Thèse Doctorat 2007.
- [17] TISSI « Simulation d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) connecté au réseau » université de Bouira, 2014.
- [18] BENSACI Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » mémoire master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012.
- [19] Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque » mémoire de master Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued 2015.
- [20] B. Meyer, M. Jerosolinski et M. Stubble, Outils de simulation Dynamique des réseaux Electriques, Technique de l'ingénieur, D4-120 Traité de Génie Electrique, 1998.
- [21] P.W. Sauer, M.A. Pai, Power System Dynamics and Stability, Pearson Education Pte. Ltd., Singapore, 1998.
- [22] A. Chakrabarti, S. Halder, Power System Analysis Operation and Control, PHI learning Pvt Ltd., India, New Delhi, 2010.
- [23] E.V. Larsen, D.A. Swann, Applying power system stabilizer, Part I: General concept, Part II: Performance objective and tuning concept, Part III: Practical considerations, IEEE Trans. Power Ap. Syst. PAS-100 (12) (1981) 3017–3046.
-

- [24] R.A. Lawson, D.A. Swann, G.F. Wright, Minimization of power system stabilizer torsional Interaction on large steam turbine-generators, IEEE Trans. Power Ap. Syst. PAS-97 (1) (1978), 183–190.
- [25] E. Acha, V.G. Agelidis, O.A. Lara, T.J.E. Miller, Power Electronics Control in Electrical Systems, Newnes Power Engg. Series, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2002.
- [26] R.M. Mathur, R.K. Varma, Thyristor Based-FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, IEEE Press, Wiley & Sons, Inc. Publication, USA, 2002.
- [27] CHEBANA Abdelkrim «control d'un système photovoltaïque connecté au réseau» mémoire master, Université Mohamed khider Biskra, 2014.
- [28] Bo Zhao , Yong Yang , Xuesong Zhang , Meidong Xue , Peng Li , Chen Xu , Dan Zhou “Implementation of a dual-micro grid system with flexible configurations and hierarchical control in China”, Renewable and Sustainable Energy, 2016.

## ملخص:

الشبكة الذكية هي شبكة الكهرباء التي تربط توليد الطاقة والاستهلاك و التخزين معا وتنسيقها بشكل مستقل. ومن ثم فان هذا النوع من الشبكات يجعل من الممكن التحول من نظام الإنتاج القائم على الطلب إلى نظام الاستهلاك القائم على العرض، الذي سيتعين عليه أن يتكيف في المستقبل مع التغيرات العشوائية في إنتاج طاقة الرياح و الطاقة الشمسية. وينبغي أن تساعد هذه الشبكة على خفض تكاليف شبكة التوزيع و تنظيم الطاقة، و إدماج الطاقات المتجددة في الشبكة و تحسين كفاءة النظام بأكمله. و الهدف من هذا المشروع هو دراسة دمج موقع الشبكة الضوئية في الشبكة الذكية .

**كلمات مفتاحية:** الشبكة الذكية، الشبكة الضوئية، نمذجة مولد الشبكة الضوئية، شبكة مصغرة.

## Résumé :

Un smart grid (littéralement «réseau intelligent») est un réseau électrique reliant ensemble la production, la consommation et le stockage de l'électricité et les coordonnant de manière autonome. Ce type de réseau permet par conséquent de passer d'un système de production dépendant de la demande à un système de consommation basé sur l'offre, qui devra à l'avenir s'adapter aux variations aléatoires de la production d'énergies éolienne et solaire. Ce réseau doit contribuer à réduire les coûts relatifs au réseau de distribution et à l'énergie de réglage, à intégrer les énergies renouvelables au réseau et à améliorer l'efficacité de l'ensemble du système.

L'objectif de ce projet est de étudier l'intégration d'un site photovoltaïque dans un réseau Smart Grid.

**Mots Clés:** Smart Grid, Photovoltaïque, modélisation générateur photovoltaïque, micro-réseau.

## Abstract:

A smart grid (literally "intelligent network") is an electrical supply network connecting together the production, the consumption and the storage of electricity and coordinating them in an autonomous way. This type of network consequently makes it possible to pass from a system of production depending on the request to a system of consumption based on the offer, which will have in the future to adapt to the random variations of the energy production wind and solar. This network must contribute to reduce the costs relating to the distribution network and the energy of adjustment, to integrate renewable energies into the network and to improve the effectiveness of the whole of the system.

The objective of this project is of studies the integration of a photovoltaic site in a network Smart Grid.

**Key Words:** Smart Grid, Photovoltaic, Photovoltaic Modeling Generator, Microphone-Network.