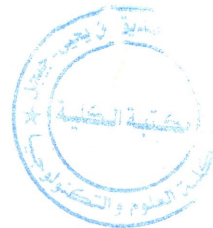


*République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique*

*Université  
Mohamed Seddik Benyahia (Jijel)*

*Faculté des Sciences et de la Technologie*



## *Mémoire*

*Pour l'obtention du diplôme de Master en  
Automatique  
Option : Automatique et traitement de signal*

*Thème*

M2 S 11

*Modélisation et Commande d'un  
système photovoltaïque par l'approche  
multimodèle*

*Proposé par :  
M<sup>me</sup> Dounia SAIFIA*

*Réalisé par :  
Bounar abdel hamid  
Kriket Souad*

**Année 2015/2016**

## *Remerciements*

*Avant tout, nous adressons nos remerciements à ELLAH, le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné pour la réalisation de ce travail que nous espérons être utile.*

*Nos remerciements sont aussi adressés à : Notre encadreur << M<sup>me</sup> : Dounia Saifia >> de nous avoir confié ce projet et dirigé dans son élaboration jusqu'au bout.*

*Nous exprimons aussi, nos remerciements et nos gratitudeux aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.*

*Enfin, nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.*





## Dédicace

Au nom de Dieu je dédie ce mémoire

A mes parents qui ont su me soutenir tout long de mes  
études,

parfois me reconforter dans les moments difficiles,

et qui sans eux je n'aurai pas effectué ce travail

Je dédie ce modeste travail

A celle qui m'a comblé d'amour et

de tendresse,

Ma chère maman

A celui qui m'a donné le meilleur de lui-même, qui a sacrifié

Son bonheur pour moi, cher papa

A mes très chères sœurs

A mes chers frères

A mon cher frère Bilel Bencharif

A mes très chers amis

HAQIM D

## Dédicace

Au nom de Dieu je dédie ce mémoire

A mes parents qui ont su me soutenir tout long de mes  
études,

parfois me reconforter dans les moments difficiles,

et qui sans eux je n'aurai pas effectué ce travail

Je dédie ce modeste travail

A celle qui m'a comblé d'amour et

de tendresse,

Ma chère maman

A celui qui m'a donné le meilleur de lui-même, qui a sacrifié

Son bonheur pour moi, cher papa

A mes très chères sœurs

A mes très chers amis

SOUAD



## Sommaire

---

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes Photovoltaïques</b>	
<b>1.1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Sources de l'énergie renouvelable .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Energie solaire .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Rayonnement solaire .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5. Potentiel solaire en Algérie .....</b>	<b>5</b>
<b>1.6. Effet photovoltaïque .....</b>	<b>5</b>
<b>1.7. Cellule photovoltaïque .....</b>	<b>6</b>
<b>1.7.1. Cellule photovoltaïque et le cristal de silicium .....</b>	<b>6</b>
<b>1.7.1.1. Silicium mono- cristallin .....</b>	<b>6</b>
<b>1.7.1.2. Silicium multi- cristallin .....</b>	<b>6</b>
<b>1.7.2. Cellule organiques et plastiques .....</b>	<b>7</b>
<b>1.8. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque .....</b>	<b>8</b>
<b>1.8.1. Cellule photovoltaïque .....</b>	<b>8</b>
<b>1.8.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....</b>	<b>8</b>
<b>1.8.3. Module photovoltaïque .....</b>	<b>9</b>
<b>1.9. Panneau photovoltaïque .....</b>	<b>10</b>
<b>1.10. Installation des panneaux .....</b>	<b>10</b>
<b>1.11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire .....</b>	<b>12</b>

1.11.1. Avantages .....	12
1.11.2 Inconvénients .....	12
1.12. Conclusion .....	13
<b>Chapitre 2 : Modélisation non linéaire des Systèmes Photovoltaïque</b>	
2.1. Introduction .....	14
2.2. Circuit équivalent d'une cellule solaire .....	14
2.2.1. Cas d'une cellule idéal .....	14
2.2.2. Cas d'une cellule réelle .....	15
2.3. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) .....	16
2.3.1. Association des cellules photovoltaïques en série .....	16
2.3.2. Association des cellules photovoltaïques en parallèle .....	17
2.3.3. Association des cellules photovoltaïques en série-parallèle .....	18
2.4. Etude des caractéristiques des panneaux photovoltaïque .....	19
2.4.1. Influence de l'éclairement .....	19
2.4.2. Influence de la Température .....	20
2.5. La commande MPPT .....	22
2.5.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque .....	22
2.5.2. Principe du MPPT .....	22
2.6. Convertisseur DC-DC .....	23
2.7. Modélisation non linéaire du système PV avec convertisseur DC- DC .....	23
2.8. Résultats de simulation .....	26



2.9. Conclusion .....	29
-----------------------	----

### **Chapitre 3 : Représentation multi-modèle D'un système photovoltaïque**

3.1. Introduction .....	30
3.2. Les multimodèles.....	30
3.3. Représentation multi-modèle.....	31
3.4. Différentes structures multimodèles.....	32
3.4.1. Structure découplée.....	33
3.4.2. Structure couplée.....	33
3.4.3. Structure hiérarchique.....	33
3.5. Modèles Flous de Takagi-Sugeno.....	33
3.6. Obtention des modèles de Takagi-sugeno.....	36
3.6.1. Par identification.....	36
3.6.2. Par linéarisation.....	36
3.6.3. Modélisation par l'approche des secteurs non linéaires.....	37
3.7. Représentation multimodèle du système PV avec convertisseur DC-DC.....	38
3.8. Validation du multimodèle.....	41
3.9. Conclusion.....	42

### **Chapitre 4 : Commande MPPT du système photovoltaïque**

4.1. Introduction.....	43
4.2. Stabilité au sens de Lyapunov.....	43
4.3. Fonction de Lyapunov quadratique.....	43

4.4. Stabilité et stabilisation des modèles de type T-S.....	44
4.4.1. Stabilité des modèles T-S .....	44
4.4.1.1. Stabilité globale .....	44
4.4.1.2. Stabilité locale et stabilité globale .....	45
4.5. Inégalités Matricielles Linéaires (LMI) .....	46
4.6. Stabilisation par retour d'état des modèles T-S.....	48
4.6.1. Lois de commande PDC.....	48
4.7. Stabilisation du système PV.....	49
4.8. Poursuite de point maximale.....	51
4.9. Résultats de simulation.....	51
4.10. Conclusion.....	53
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>54</b>



# Notations

## Ensembles et domaines

$\mathbb{R}$	Ensemble des nombres réels.
$\mathbb{R}^p$	Espace réel euclidienne de dimension $p$ .
$C^1$	Ensemble des fonctions continûment dérivable.

## Acronymes

LMI	Linear Matrix Inequality.
PDC	Parallel Distributed Compensation.
LTI	Linéaire a Temps Invariant.
T-S	Takagie-Sugeno.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.

## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Photo (a) mono- cristallin (b) multi- cristallin.....	7
<b>Figure 1.2.</b> cellule solaire tout organique.....	7
<b>Figure 1.3.</b> Les différents types des dispositifs PV.....	8
<b>Figure 1.4.</b> Représentation d'une jonction PN.....	9
<b>Figure 1.5.</b> Module photovoltaïque.....	9
<b>Figure 1.6.</b> Photo des Panneau photovoltaïque .....	10
<b>Figure 2.1.</b> Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	14
<b>Figure 2.2.</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	16
<b>Figure 2.3.</b> Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.....	17
<b>Figure 2.4.</b> Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	18
<b>Figure 2.5.</b> Association mixte des modules.....	18
<b>Figure 2.6.</b> Caractéristique du courant $I_{PV}$ du module PV selon l'éclairement.....	19
<b>Figure 2.7.</b> Caractéristique de puissance du module PV selon l'éclairement.....	20
<b>Figure 2.8.</b> Caractéristique courant $I_{PV}$ du module PV selon la température.....	20
<b>Figure 2.9.</b> Caractéristique de puissance du module PV selon la température.....	21
<b>Figure 2.10.</b> Caractéristique du point de puissance maximale $M_{pp}$ .....	21
<b>Figure 2.11.</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	22
<b>Figure 2.12.</b> Schéma d'un convertisseur DC-DC.....	23
<b>Figure 2.13 :</b> Forme d'impulsion générée par le circuit PWM.....	24
<b>Figure 2.14.</b> Schéma d'un convertisseur DC-DC ou le transistor est saturée.....	24
<b>Figure 2.15.</b> Schéma d'un convertisseur DC-DC ou le transistor est bloqué.....	25
<b>Figure 2.16.</b> Réponse du système non linéaire $i_l(t)$ .....	28
<b>Figure 2.17.</b> Réponse du système non linéaire $V_{pv}(t)$ .....	28
<b>Figure 2.18.</b> Réponse du système non linéaire $V_b(t)$ .....	28
<b>Figure 2.19.</b> Puissances et sa dérivée par rapport à la tension.....	29
<b>Figure 3.1.</b> Schéma de principe de zone de fonctionnement de validité des modèles locaux a)- Zones de fonctionnement b)-Domaine de validité disjoints c)- Domaine de fonctionnement avec recouvrement.....	31
<b>Figure 3.2.</b> Structure et implémentation d'un modèle T-S.....	35
<b>Figure 3.3.</b> Réponse du système non linéaire et le modèle T-S $i_l(t)$ .....	41
<b>Figure 3.4.</b> Réponse du système non linéaire et le modèle T-S $V_{pv}(t)$ .....	41
<b>Figure 3.5.</b> Réponse du système non linéaire et le modèle T-S $V_b(t)$ .....	42



## Liste des figures

---

<b>Figure 4.1.</b> Ensemble invariant dans le cas d'un système à trois dimensions... ..	45
<b>Figure 4.2.</b> Représentation de concept PDC... ..	48
<b>Figure 4.3.</b> <i>Trajectoire de la commande <math>u(t)</math></i> ... ..	52
<b>Figure 4.4.</b> <i>Trajectoire de la puissance <math>P_{pv}(t)</math></i> . ... ..	52
<b>Figure 4.5.</b> <i>Variation de la dérivée de puissance <math>y(t)</math></i> . ... ..	52

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau 1.1.</b> Potentiel solaire en Algérie.....	5
<b>Tableau 2.1.</b> <i>Paramètres du PV SP75</i> .....	27
<b>Tableau 3.1 :</b> tableau des règles floues.....	41



# **Introduction Générale**

## Introduction générale

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [1].

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante, car la protection de l'environnement est devenue un point important. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Pour une installation photovoltaïque, la variation de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie ; c'est le principe nommé MPPT (Maximum Power Point Tracker) [2]-[12]. L'objectif principal de ce travail est de réaliser une commande MPPT en utilisant l'approche multimodèle. Elle consiste à construire une représentation polytopique convexe pour approcher le comportement d'un système non linéaire. Cette représentation peut être obtenue à partir de la linéarisation autour de différents points de fonctionnement, par identification à partir de mesures entrées-sorties ou dans certains cas par transformation mathématique directe d'un modèle affine en état [13]-[19].

Le multimodèle à état unique connu sous le nom du modèle de Takagi-Sugeno (T-S) représentant exactement le modèle non linéaire dans un compact de l'espace d'état. Les lois de commande couramment utilisées sur ce type de modèles sont de type retour d'état non linéaire statique appelé PDC (Parallèle Distributed Compensation). Ce type de loi de commande utilise les mêmes fonctions non linéaires permettant d'interpoler les modèles linéaires des modèles TS. Dans ce contexte, l'étude de la stabilité et de la stabilisation fait appel dans la grande majorité des cas à la fonction de Lyapunov quadratique. L'approche quadratique semble très attractive du fait que le problème de stabilité est facile à mettre en

œuvre sous forme d'un problème d'optimisation convexe en termes de LMI (Linear Matrix Inequality).

Le mémoire présenté est organisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous présentons une généralité sur la technologie photovoltaïque. En commençant par des notions sur le rayonnement. Par la suite, nous montrons le principe de l'effet photovoltaïque, ses avantages et ses inconvénients.

Dans le second chapitre, nous présentons la modélisation non linéaire des systèmes photovoltaïques sans et avec convertisseur DC-DC (Direct Current). Des résultats de simulation sont également exposés pour étudier et analyser les caractéristiques des systèmes photovoltaïques en boucle ouverte.

Dans le troisième chapitre, en premier lieu, nous rappelons certaines notions de base sur les modèles T-S et les différentes méthodes pour l'obtention de ces modèles. En deuxième lieu, nous donnons une représentation multimodèle du système photovoltaïque. Enfin, des résultats de simulation sont présentés afin d'illustrer l'efficacité de l'approche utilisée.

Dans le quatrième chapitre, nous étudions la stabilisation des systèmes photovoltaïques et la synthèse d'une loi de commande par retour d'état non linéaire de type PDC. Des conditions de stabilisation sont obtenues en se basant sur la méthode de Lyapunov et la formulation LMI. Finalement, des résultats de simulation du système photovoltaïque en boucle fermée sont donnés.



# Chapitre 1 :

## Généralités sur les systèmes Photovoltaïques

1.1. Introduction .....	3
1.2. Sources de l'énergie renouvelable .....	3
1.3. Energie solaire .....	4
1.4. Rayonnement solaire .....	4
1.5. Potentiel solaire en Algérie .....	5
1.6. Effet photovoltaïque .....	5
1.7. Cellule photovoltaïque .....	6
1.7.1. Cellule photovoltaïque et le cristal de silicium .....	6
1.7.1.1. Silicium mono- cristallin .....	6
1.7.1.2. Silicium multi- cristallin .....	6
1.7.2. Cellule organiques et plastiques .....	7
1.8. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque .....	8
1.8.1. Cellule photovoltaïque .....	8
1.8.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....	8
1.8.3. Module photovoltaïque .....	9
1.9. Panneau photovoltaïque .....	10
1.10. Installation des panneaux .....	10
1.11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire .....	12
1.11.1. Avantages .....	12
1.11.2. Inconvénients .....	12
1.12. Conclusion .....	13



## 1.1. Introduction

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de source fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc, une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [1].

Le soleil fournit une énergie lumineuse grandiose à la Terre. Mais le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique [1].

Ce phénomène fut découvert au 19<sup>ème</sup> siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications [2].

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs; matériaux de base des cellules photovoltaïque.

## 1.2. Sources de l'énergie renouvelable

Les sources d'énergie renouvelables soleil, vent, courant d'eau, chaleur naturelle, les déchets végétaux et animaux permettent d'obtenir, après transformation, de l'énergie mécanique, de l'électricité, de la chaleur ou un combustible. Couplées à une utilisation rationnelle de l'énergie (URE), elles permettent de réduire la consommation de combustibles d'origine fossile ou fissile, et par conséquent de réduire les impacts environnemental et socio-économique de nos

besoins en énergie. Les énergies renouvelables regroupent un grand nombre de systèmes différents selon la ressource valorisée et la forme d'énergie obtenue. Ces dernières années, les évolutions observées concernent aussi bien l'amélioration des rendements de transformation et la diminution du prix de revient de l'énergie utile produite que la qualité du service énergétique et un confort accru à l'exploitation.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque

### 1.3. Energie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 Million de Kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h. Les rayons du soleil mettent donc, environ 8 minutes à nous parvenir à la terre. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à  $1360 \text{ w/m}^2$ . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à  $1000 \text{ w/m}^2$  à cause de l'absorption dans l'atmosphère [3].

### 1.4. 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 Langevin et Perrin, 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.

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ  $0.5 \mu\text{m}$ , la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ  $5780^\circ\text{k}$  [4]

- 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  $l_{ts}=150$  million kilomètre

### 1.5. Potentiel solaire en Algérie

Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. Le plus élevés au monde.

La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, Pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1m^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700KWh/m^2/an$  au Nord et  $2263KWh/m^2/an$  au Sud du pays. Soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [5]. Donc le potentiel national en énergies renouvelables est fortement dominé par le solaire. Les zones les plus favorables sont données par le tableau suivant :

1. Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ( $kWh/m^2/an$ )	1700	1900	2650

*Tableau 1.1. Potentiel solaire en Algérie.*

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement.

### 1.6. Effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Phots », qui signifient lumière.
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique).

Appelé aussi « module photovoltaïque » c'est un panneau solaire qui est destiné à récupérer les rayonnements du soleil pour les transformer en électricité (Courant continu DC).

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [6]. L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur. Celui-ci est caractérisé par sa puissance crête exprimée en kilowatt crête (KWC) [7].

### **1.7. Cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, existe aujourd'hui deux principales filières technologiques : le silicium cristallin, et les cellules organiques.

#### **1.7.1. Cellule photovoltaïque et le cristal de silicium**

Le cristal de silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïque, il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique, ce matériau est-il-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication, ce matériau comporte deux technologies : le silicium mono- cristallin et le silicium multi- cristallin.

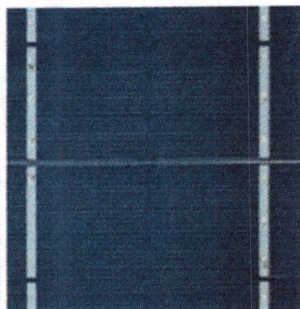
##### **1.7.1.1. Silicium mono- cristallin**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant, elles sont utilisées mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

##### **1.7.1.2. Silicium multi- cristallin**

Le silicium multi-cristallin (poly-cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée, elle obtenue par coulage de cristaux de silicium. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14 % selon les fabricants. Les coûts de production sont, donc, plus faibles.





(a)



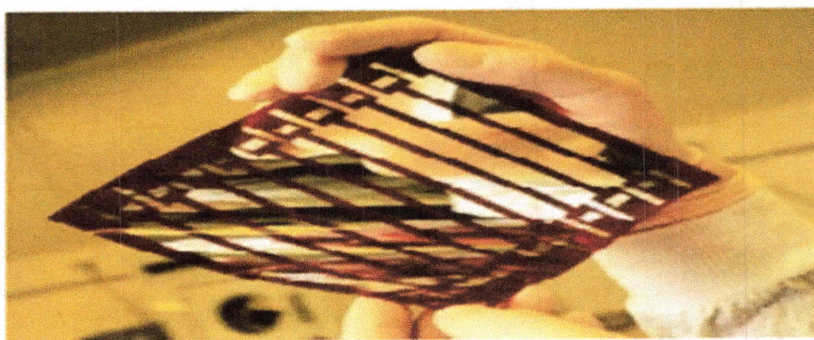
(b)

*Figure 1.1. Photo(a) mono- cristallin (b) multi- cristallin*

### 1.7.2. Cellule organiques et plastiques

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organique, les molécules organiques et les polymères semi-conducteurs offrent une alternative intéressante en raison de leur faible coût de production et des techniques de mise en œuvre. En effet, les molécules organiques et les polymères sont faciles à manipuler et leur choix comme matériau de base.

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que contrairement aux cellules à base de matériaux inorganique, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposée en grand surface, à grand vitesse par des techniques d'impression classiques, enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faible. Actuellement le rendement de ce type de cellules est de 8%.



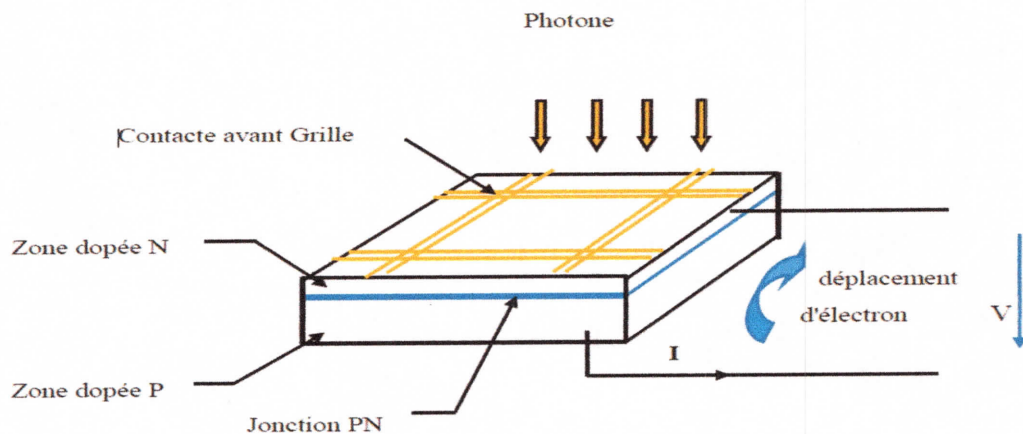
*Figure 1.2. cellule solaire tout organique*

## 1.8. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

### 1.8.1. Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées:

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [4].



*Figure 1.3. Les différents types des dispositifs PV*

### 1.8.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P).



Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [8].

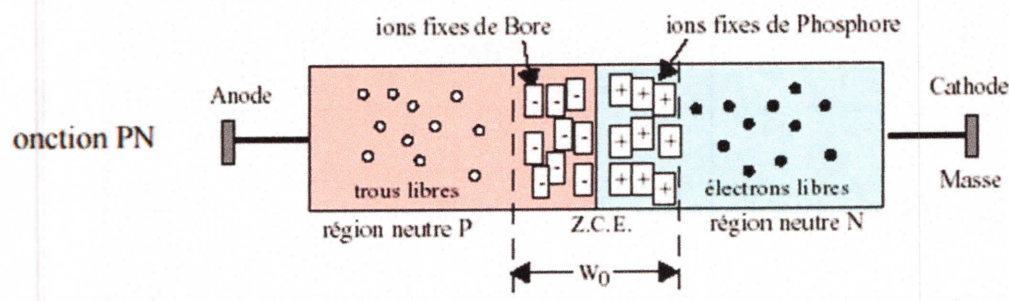


Figure 1.4. Représentation d'une jonction PN

### 1.8.3. Module photovoltaïque

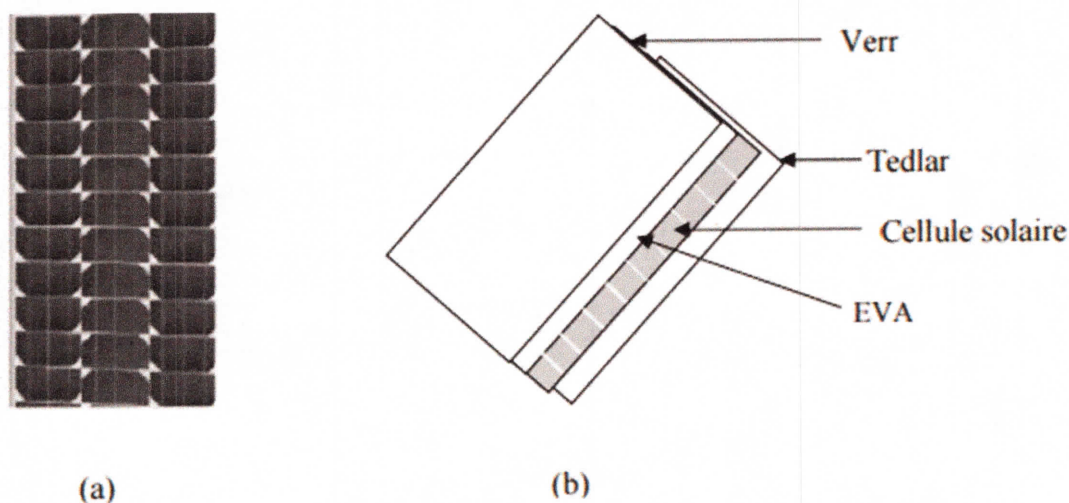
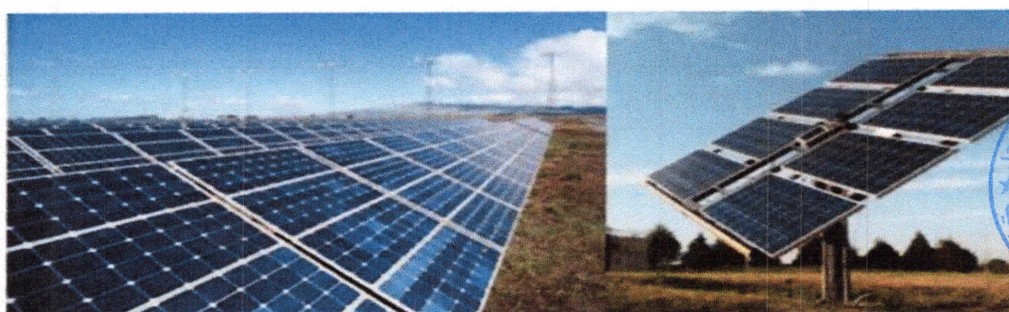


Figure 1.5. Module photovoltaïque.

Pour produire plus de la puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (1.5-a). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) figure (1.5-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière l'ensemble est protégé par une couche de polyéthylène [7].

### 1.9. Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation [9].



*Figure 1.6. Photo des Panneau photovoltaïque.*

### 1.10. Installation des panneaux

Pour l'installer les panneaux solaire dans un site, il est nécessaire de vérifier les conditions suivantes :

#### a) Disposition des panneaux :

Les structures doivent être solides, fixées au sol, pour résister à des vents d'au moins de 150 Km/h. De plus, elles doivent être fiables dans le temps, elles doivent utiliser un matériau de bonne fiabilité (outre l'aluminium anodisé, la visserie inox et la visserie inoxydable).

#### b) Fixation des panneaux :

La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes :

- Maintien de l'orientation.
- Résistance contre le vent et les autres intempéries.
- Résistance contre les agressions mécaniques.
- Protection contre les salissures, et agressions venant du sol.
- ventilation des panneaux afin de limiter leur échauffement

**c)-L'orientation des panneaux :**

L'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. Il existe aussi des structures beaucoup plus complexes qui suivent le soleil dans son mouvement quotidien pour augmenter l'énergie captée, la présence des pièces mobiles réduit la fiabilité et entraîne des coûts supplémentaires élevés. Ces structures sont surtout utilisées pour des systèmes photovoltaïques à concentration où seul le rayonnement direct est concentré sur la surface active. Il arrive cependant qu'il soit impossible d'installer le panneau exactement face au sud.

**d) Installions des éléments de la batterie**

L'utilisation de la batterie peut présenter des dangers :

Risque d'explosion, dégagement de gaz toxiques (brouillard d'acide sulfurique). En outre, leur durée de vie et le bon fonctionnement de toute l'installation dépend aussi bien des conditions d'installation que d'exploitation. Compte tenu de cela, l'installation de ces éléments doit être effectuée avec un grand soin. Ils doivent être installés dans un local approprié à l'abri des intempéries, surtout quand le produit de la capacité par la tension de décharge est supérieur à 1000 Watt. Ce local doit satisfaire à certaines exigences, qui sont les suivantes :

- D'être bien ventilé pour garantir la circulation des gaz.
- D'être à une température proche de 25°C, pour assurer le bon fonctionnement des éléments.

**e) Câblage électrique :**

Ils seront à l'extérieur, exposés au vent, au gel, au soleil et autres agressions. Il est strictement nécessaire d'utiliser des câbles adaptés à des sections (diamètre) suffisantes, il faut d'abord effectuer un branchement par un câble électrique qui sera un câble de qualité par exemple, il devra subir les agressions du vent, de la pluie, du soleil, du gel, croissance marines et autres. La section sera d'au moins 1.5 mm<sup>2</sup>, 2.5mm<sup>2</sup> dès que la longueur excède 25m ou que la puissance du module soit supérieure à 100W.

**f) Câblage de liaison :**

Il se trouve entre les modules et le régulateur, il doit être d'une section d'au moins 2,5mm<sup>2</sup> ou plus si la longueur excède 15cm. Pour une intensité inférieure à 4A, sa section sera calculée de façon à ne pas avoir plus de 6% de chute de tension.



### 1.11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont [10]:

#### 1.11.1. **Avantage** : Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie [8].
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

#### 1.11.2 **Inconvénients**

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.

- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V). Donc, il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

### 1.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes notions de base sur les systèmes PV, ainsi que son principe de fonctionnement. Finalement, les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire sont exposés.

## Chapitre 2 :

# Modélisation non linéaire des Systèmes

## Photovoltaïque

2.1. Introduction .....	14
2.2. Circuit équivalent d'une cellule solaire .....	14
2.2.1. Cas d'une cellule idéal .....	14
2.2.2. Cas d'une cellule réelle .....	15
2.3. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) .....	16
2.3.1. Association des cellules photovoltaïques en série .....	16
2.3.2. Association des cellules photovoltaïques en parallèle .....	17
2.3.3. Association des cellules photovoltaïques en série-parallèle .....	18
2.4. Etude des caractéristiques des panneaux photovoltaïque .....	19
2.4.1. Influence de l'éclairement .....	19
2.4.2. Influence de la Température .....	20
2.5. La commande MPPT .....	22
2.5.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque .....	22
2.5.2. Principe du MPPT .....	22
2.6. Convertisseur DC-DC .....	23
2.7. Modélisation non linéaire du système PV avec convertisseur DC- DC .....	23
2.8. Résultats de simulation .....	26
2.9. Conclusion .....	29

## 2.1. Introduction

Une cellule photovoltaïque (ou photopile) est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La première photopile a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs de laboratoire Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des quelques années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quittés les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. Actuellement, l'objectif essentiel est devenu la production de l'électricité, sans pollution, pour l'alimentation des réseaux de distribution [11].

## 2.2. Circuit équivalent d'une cellule solaire

### 2.2.1. Cas d'une cellule idéal

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (2.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [6].

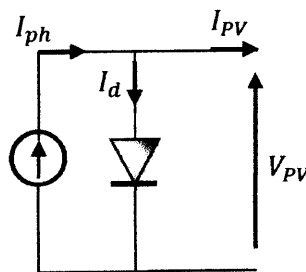


Figure 2.1. Schéma équivalent d'une cellule idéale

❖ Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d \quad (2.1)$$

$I_{PV}$  : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

Le courant  $I_{ph}$  est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température selon la relation suivante :

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_I(T - T_r)] \cdot \lambda / 1000 \quad (2.2)$$

$K_I$  : Coefficient de température (de court-circuit) [(mA/°k)].

$\lambda$  : Eclairage absorbé par la cellule [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ].

$T$  : Température de la jonction des cellules PV [ $^{\circ}\text{K}$ ].

$T_r$  : Température de référence des cellules PV [ $^{\circ}\text{K}$ ].

$I_d$  : Courant circulant dans la diode [A].

$V_{PV}$  : Tension aux bornes de la diode [V].

$I_{sc}$  : Courant de la cellule de court-circuit à la température de référence et l'insolation

$I_{ph}$  : Photo-courant dépendant de l'éclairage.

Le courant  $I_d$  est donné par :

$$I_d = I_0 (e^{K_{pv} V_{pv}} - 1)$$

et par définition :

$V_d$  : Tension à la borne de diode et  $V_d = V_{PV}$

$I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode.

$$K_{pv} = q / (pKT)$$

où

$q$ : Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ).

$K$  : Constant de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ ).

$p$  : Facteur caractéristique ( $p=1-5$ ).

Le courant de saturation inverse est défini comme suit :

$$I_0 = I_{or} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{\frac{3}{q}} e^{\left[ \frac{E_{gp}}{pK} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (2.3)$$

où

$I_{or}$  : Courant de court-circuit de la cellule à la température de référence  $T_r$  et l'éclairage de référence

$E_{gp}$ : Energie de gap (eV).

### 2.2.2. Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (2.2). Ce schéma équivalent est



constitué d'une diode caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photo-courant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte ( $R_p$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ) [11].

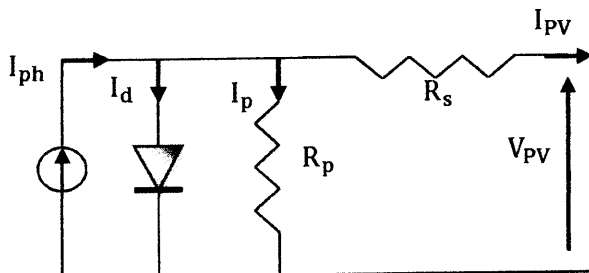


Figure 2.2. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

La tension au borne de la diode est donnée par :

$$V_d = V_{PV} + R_s I_{PV}$$

Où :

$R_s$ : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur.

$R_p$ : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction PN dues aux impuretés et sur les coins des cellules.

Dans ce cas, le courant  $I_{PV}$  fourni est défini comme suit :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 (e^{(V_{PV} + R_s I_{PV}) / K_{PV}} - 1) - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_p} \quad (2.4)$$

### 2.3. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, les courants de chaque cellule s'additionnent, augmentant le courant total du générateur [12].

#### 2.3.1. Association des cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série des cellules identique est obtenue par addition des tensions à courant donné.

Nous considérons que :

$I_{PV0}$  et  $V_{CO}$  sont respectivement le courant et la tension de chaque cellule.

Le courant global du panneau photovoltaïque est :

$$I_{PV} = I_{PV0}$$

La tension résulte est :

$$V_{PV} = n_S \times V_{CO} \quad (2.5)$$

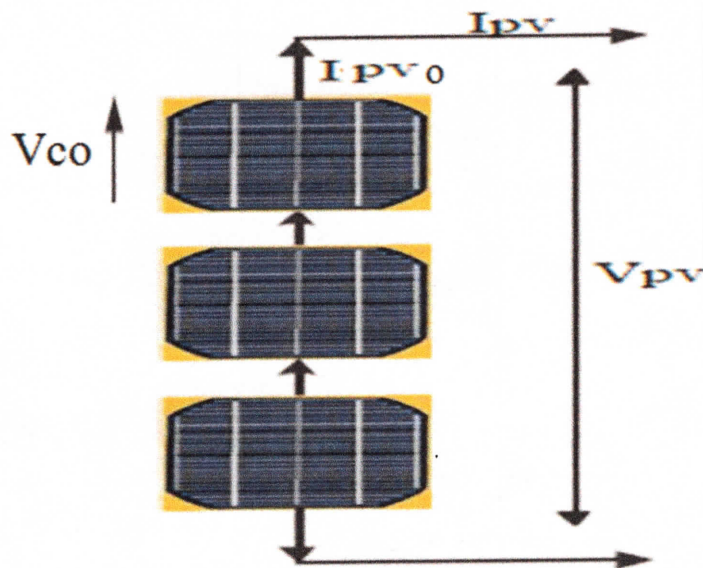


Figure 2.3. Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série

### 2.3.2. Association des cellules photovoltaïques en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules identiques connectées en parallèle. Montrent les caractéristiques résultantes ( $I_{PV}, V_{CO}$ ) obtenues en associant en parallèle (indice  $p$ )  $n_p$  cellules identiques :

Si  $I_{CP}$  est le courant fourni par chaque cellule.

alors

$$I_{PV} = n_p \times I_{CP} \text{ et } V_{PV} = V_{CO} \quad (2.6)$$

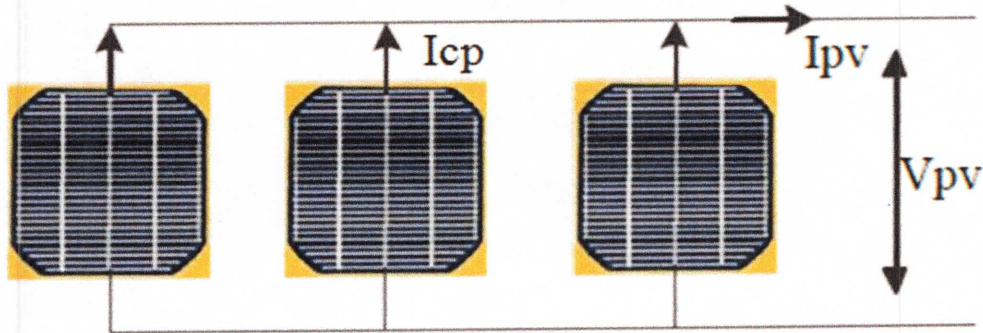


Figure 2.4. Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

2.3.3. Association des cellules photovoltaïques en série-parallèle

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (2.5). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $n_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $n_p$  parallèlement à l'axe des courants.

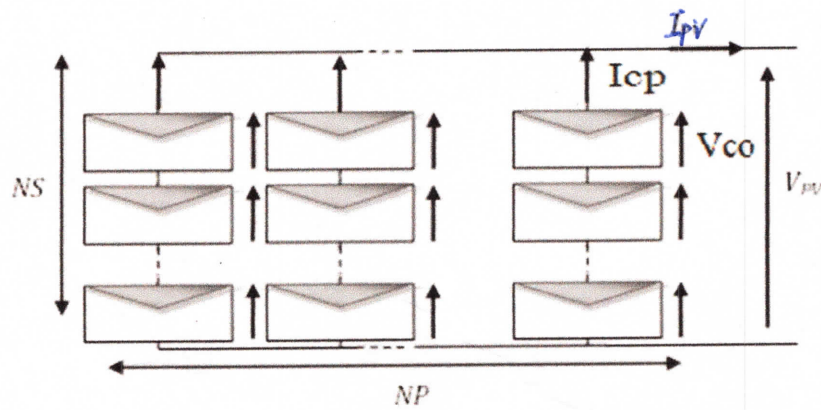


Figure 2.5. Association mixte des modules.

En considérant le PV composé des cellules  $n_p$ -en parallèle, cellules  $n_s$ -en série,  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  respectivement, voltage-courant de PV, on a :

Le courant fourni par chaque cellule est :

$$I_{cp} = I_{pv} - I_0(e^{K_{pv}V_{co}} - 1)$$

La tension aux bornes de chaque cellule est donnée par la relation suivante :

$$V_{co} = \frac{V_{pv}}{n_s}$$

Par conséquent, le courant  $I_{Cp}$  est :

$$I_{Cp} = I_{pv} - I_0 \left( e^{\frac{K_{PV}V_{PV}}{n_s}} - 1 \right)$$

Le courant généré par l'association  $n_p$ -cellules en parallèle et  $n_s$ -cellules en série est défini par la relation suivante :

$$\begin{aligned} I_{pv} &= n_p (I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{K_{PV}V_{PV}}{n_s}} - 1 \right)) \\ &= n_p I_{ph} - n_p I_0 \left( e^{\frac{K_{PV}V_{PV}}{n_s}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

## 2.4. Etude des caractéristiques des panneaux photovoltaïque

Pour la vérification des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque monocristallins via l'étude de l'influence des grandeurs d'entrées tel que l'éclairement et la température sur la puissance de sortie, on a fait une simulation en utilisant les modèles mathématiques qui régissent le fonctionnement d'un panneau PV.

Les paramètres utilisés dans la simulation sont :

$$I_{or} = 1.95 \times 10^{-5} A; T = 323.18 K; P = 1.8; q = 1.6 \times 10^{-19} C; T_r = 298 K; n_p = 1;$$

$$n_s = 36; K = 1.3805 \times 10^{-23} J/K; C_a = 1000 \times 10^{-6} F; E_{gp} = 1.1 eV; i_{sc} = 4.8 A;$$

$$K_i = 2.06 mA/^{\circ}C$$

### 2.4.1. Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 50 w/m<sup>2</sup> et 80 w/m<sup>2</sup> avec un pas de 10. Les caractéristiques ( $I_{pv} = f(V_{pv})$  et  $P_{pv} = f(V_{pv})$ ) sont respectivement données par les figures (2.6) et (2.7).

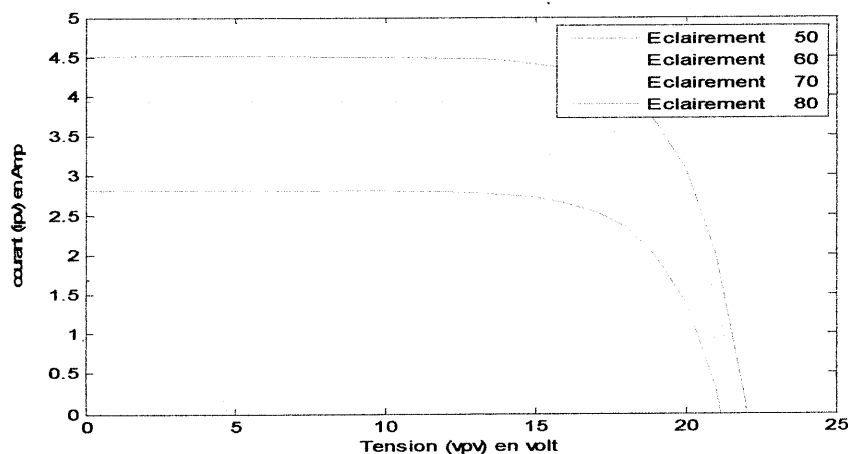


Figure 2.6. Caractéristique du courant  $I_{PV}$  du module PV selon l'éclairement.

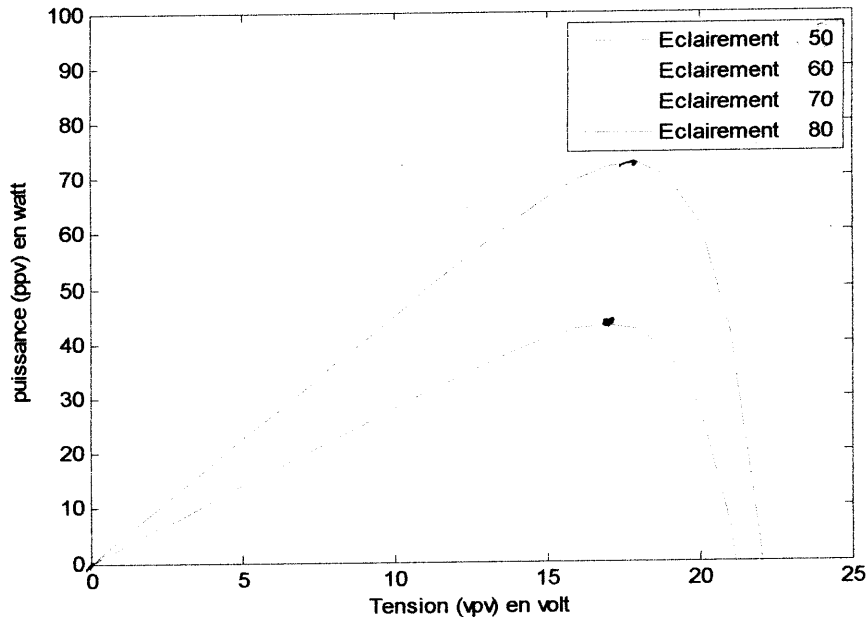


Figure 2.7. Caractéristique de puissance du module PV selon l'éclairement.

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement a température constante, montrent clairement l'existence de maximal sur les courbes de puissance correspondant aux point de puissance maximal (P max).

### 2.4.2. Influence de la Température

En faisant varier la température de 300K jusqu'à 320K, les caractéristiques ( $I_{pv}=f(V_{pv})$  et  $P_{pv}=f(V_{pv})$ ) sont respectivement données par les figures (2.8) et (2.9).

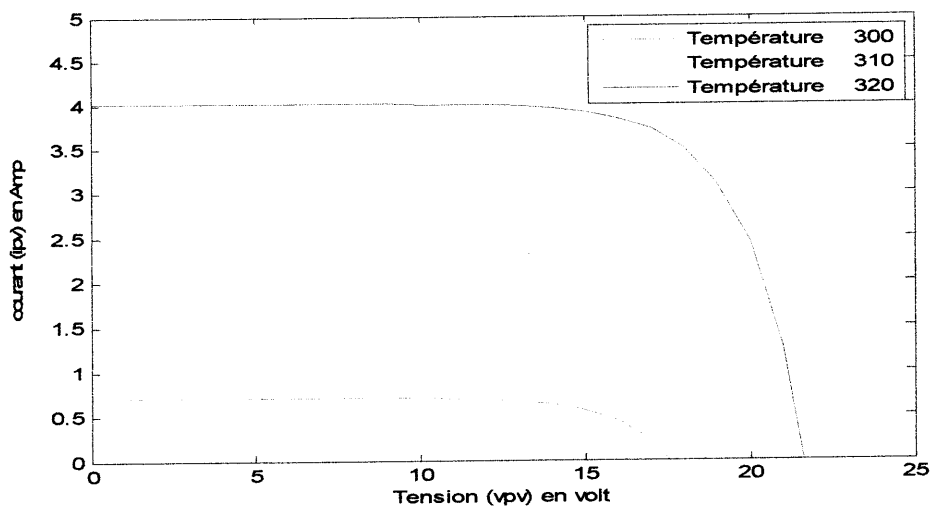


Figure 2.8. Caractéristique courant  $I_{pv}$  du module PV selon la température.

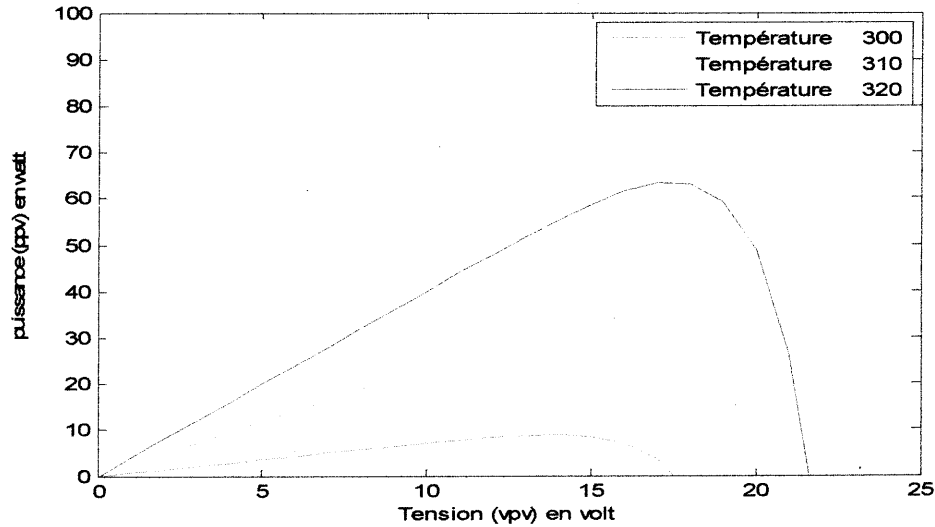


Figure 2.9. Caractéristique de puissance du module PV selon la température.

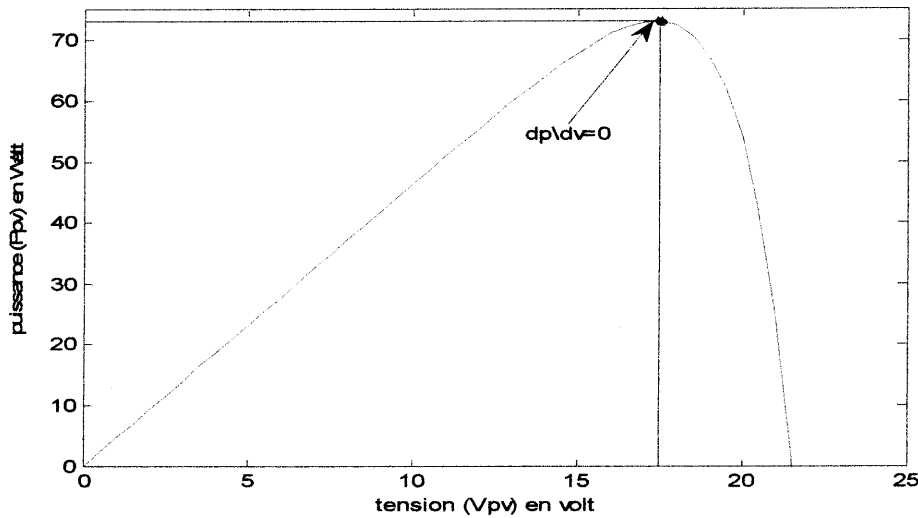


Figure 2.10. Caractéristique du point de puissance maximale Mpp

D'après les figures (2.8) et (2.9), on remarque que la puissance  $P_{PV}$  augmente avec la croissance de la température. La variation du courant  $i_{PV}$  est faible en le comparant au comportement de cette puissance en fonction de la température. Cette influence sur  $i_{PV}$  peut être négligée dans la majorité des cas. Le point maximal sur les courbes de puissance, se déplace avec la variation de la température. Cependant, si on fixe la valeur de température et d'éclairement, on trouve un seul point maximal PPM( $V_{PV}^*$ ,  $P_{PV}^*$ ). Par exemple, la figure (2.10) illustre la caractéristique  $P_{PV} = f(V_{PV})$  pour une température ( $T = 40^\circ\text{C}$ ) et éclairement ( $E = 130 \text{ w/m}^2$ ).

Le point maximal est  $(V_{PV}^*, P_{PV}^*) = (17, 72)$ .



Théoriquement, le point de puissance maximale PPM est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = i_{PV} + V_{PV} \times \frac{di_{PV}}{dV_{PV}} = i_{PV} - \frac{n_p K_{PV}}{n_s} i_{rs} V_{PV} e^{K_{PV} V_{PV} / n_s} = 0 \quad (2.8)$$

La puissance maximale débitée par le panneau photovoltaïque est donnée par le produit entre la tension  $V_{PV}$  et le courant  $i_{PV}$ :

$$P_{PV} = V_{PV} \times i_{PV} \quad (2.9)$$

## 2.5. La commande MPPT

Un MPPT (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont, généralement, associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [12].

### 2.5.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [12].

### 2.5.2. Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. ( $V_{PV}^* * I_{PV}^*$ ). Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (PPM) [12]. L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (2.10)

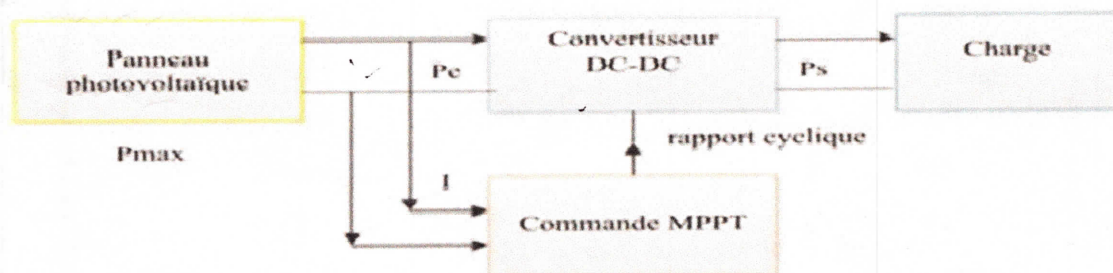


Figure 2.11. Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.



## 2.6. Convertisseur DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont des circuits électriques qui transfèrent l'énergie d'une source de tension à une charge. Ils produisent une tension de sortie régulée, ayant une grandeur qui diffère de tension d'entrée. Le convertisseur DC-DC fournit une tension réglée selon le besoin du circuit d'application. L'opération de conversion est réalisée par des composants électriques tels que, les transistors, les diodes et les filtres. Le composant semi-conducteur de puissance est utilisé comme commutateur pour contrôler en marche et en arrêt l'approvisionnement de tension à la charge. L'action de commutation peut être assurée par un hacheur ou un transistor de type MOSFET. Un convertisseur DC-DC avec un seul commutateur est souvent connu sous le nom : découpeur de DC [1].

## 2.7. Modélisation non linéaire du système PV avec convertisseur DC- DC

La figure (2.12) montre un schéma électrique d'un convertisseur DC-DC.  $R_L$  est la résistance d'inductance,  $V_d$  est le seuil de la diode et  $R_b$  est une résistance équivalente des résistances en série (ESR) de filtre capacitif.

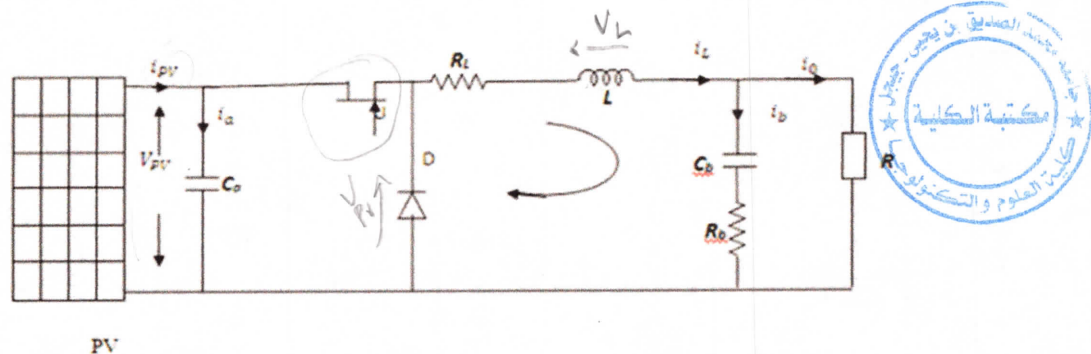


Figure 2.12. Schéma d'un convertisseur DC-DC

L'état de transistor est contrôlé par un signal binaire  $u_b(t)$ . Si  $u_b(t) = 0$ , le transistor sera bloqué (interrupteur ouvert). Si  $u_b(t) = 1$ , le transistor sera saturé (interrupteur fermé). Le signal  $u_b(t)$  est généré en comparant un signal triangulaire de fréquence  $\frac{1}{T_s}$  et d'amplitude 1 de circuit PWM (Pulse Width Modulation) avec le rapport cyclique  $d(t) = \frac{T_{on}}{T_s}$  (voir figure 2.13).

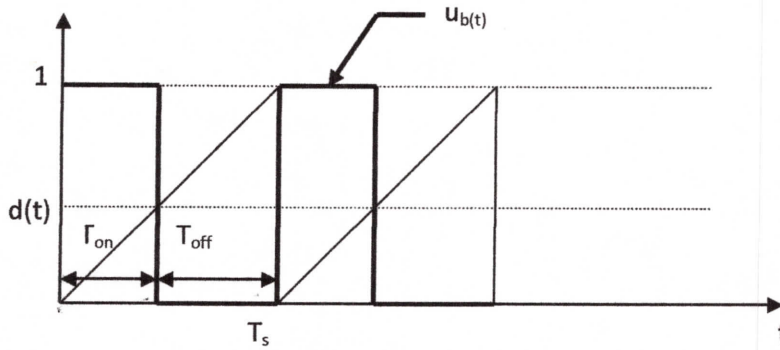


Figure 2.13. Forme d'impulsion générée par le circuit PWM

Dans le cas, où le transistor est saturé (interrupteur fermé), le schéma électrique équivalent de la figure (2.14).

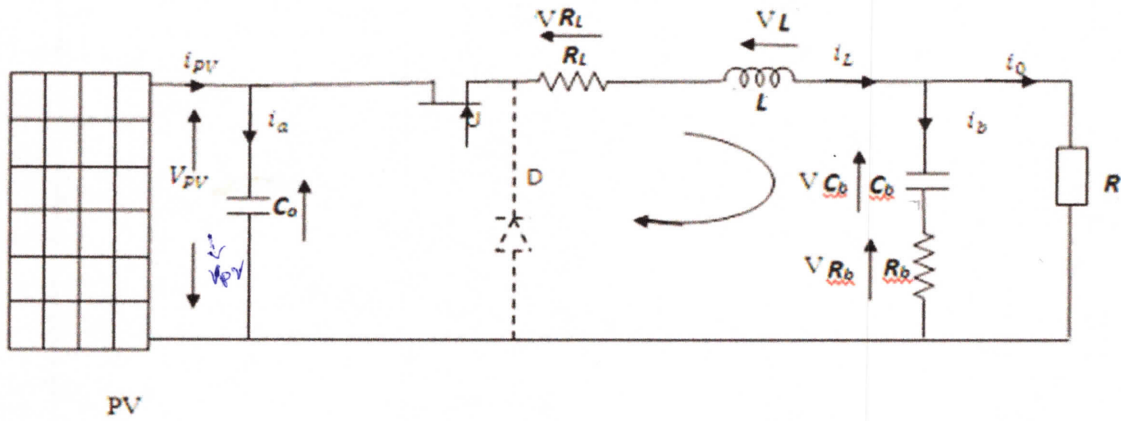


Figure 2.14. Schéma d'un convertisseur DC-DC ou le transistor est saturée

L'application de la loi de Kirchhoff des mailles et des nœuds, nous donne les équations différentielles suivantes :

$$V_{PV} = V_L + V_{R_L} + V_{C_b} + V_{R_b} \tag{2.10}$$

avec

$$V_{C_b} = \frac{1}{C_b} \int i_b dt.$$

$$V_{PV} = \frac{1}{C_a} \int i_a dt.$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$V_{R_b} = R_b \times i_b.$$

$$i_b = i_L - i_o$$

$$i_a = i_{PV} - i_L.$$

Nous considérons l'équation (2.10), les équations différentielles associées à ce système sont les suivantes :

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} [-(R_L + R_b)i_L - V_b + R_b i_0] \\ \dot{V}_{PV} = \frac{1}{C_a} (i_{PV} - i_L) \\ \dot{V}_b = \frac{1}{C_b} (i_L - i_0) \end{cases} \quad (2.11)$$

Dans le cas, où transistor est bloqué (l'interrupteur ouvert) est saturé, le schéma électrique équivalent de la figure (2.15).

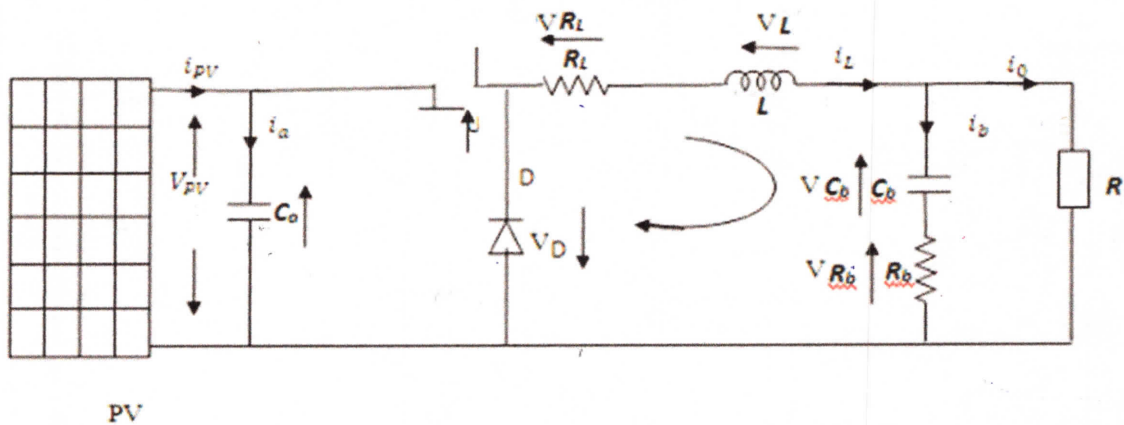


Figure 2.15. Schéma d'un convertisseur DC-DC ou le transistor est bloqué

L'application de la loi de Kirchhoff des mailles et des nœuds nous donne les équations différentielles suivantes :

$$V_{C_b} = V_D + V_{R_L} + V_L + V_{R_b} \quad (2.12)$$

$$V_{C_b} = V_D + R_L i_L + L \frac{di}{dt} + R_b (i_L - i_0)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_{C_b}}{L} - \frac{V_D}{L} - \frac{R_L}{L} i_L - \frac{R_b}{L} i_L + \frac{R_b}{L} i_0$$

ou bien de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L} [-(R_L + R_b)i_L - V_D - V_{C_b} + R_b i_0] \\ \dot{V}_{PV} = \frac{1}{C_a} (i_{PV}) \\ \dot{V}_b = \frac{1}{C_b} (i_L - i_0) \end{cases} \quad (2.13)$$

En utilisant la méthode AM-OTS-Ds [20]. Et à partir des équations différentielles (2.11) et (2.13), le modèle global du convertisseur DC-DC peut s'écrire par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{1}{L}(R_b i_0 - (R_b + R_L)i_L - V_b + (V_D + V_{PV})u - V_D) \\ \dot{V}_{PV} = \frac{1}{C_a}(i_{PV} - i_L u) \\ \dot{V}_b = \frac{1}{C_b}(i_L - i_0) \end{cases} \quad (2.14)$$

ou sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{V}_{PV} \\ \dot{V}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}(R_L + R_b i_b) & 0 & -1/L \\ 0 & \frac{1}{C_a} G_a & 0 \\ \frac{1}{C_b} i_b & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{PV} \\ V_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L}(V_D + V_{PV}) \\ -\frac{1}{C_a} i_L \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \left(-\frac{V_D}{L}\right) \quad (2.15)$$

### 2.8. Résultats de simulation

Dans cette section, on va faire une simulation en Boucle ouverte d'un système photovoltaïque de type SP75.

Les valeurs des paramètres de ce système sont données par le tableau suivant [20]:

Paramètres de simulation	valeurs (unité)
Courant à circuit ouvert ( $I_{or}$ )	$1.95 \times 10^{-5} A$
Résistance interne entre la capacité ( $r_b$ )	$0.162 \Omega$
Stockage d'Inductance ( $L$ )	$150 \times 10^{-6} H$
Stockage de capacité ( $C_b = C_a$ )	$1000 \times 10^{-6} F$
Résistance interne entre l'inductance ( $r_L$ )	$1 \Omega$
la tension de la diode ( $V_d$ )	$0.57 V$
courant de saturation ( $i_{rr}$ )	$1.95 \times 10^{-5} A$
constant de Boltzmann ( $K$ )	$1.3805 \times 10^{-23} J/K$



charge de l'électron ( $q$ )	$1.6 \times 10^{-19} C$
la cellule en parallèle ( $n_p$ )	1
la cellule en séries ( $n_s$ )	36
Courant de la cellule de court-circuit ( $i_{sc}$ )	4.8 A
facteur de l'injection (p)	1.8
Energie de gap ( $E_{gp}$ )	1.1 eV
court- circuit du courant à temp.coef ( $K_i$ )	2.06 mA/°C
la Température référence ( $T_r$ )	298 K
Température de la jonction des cellules PV(T)	323.18K
Eclairement absorbé par la cellule ( $\lambda$ )	80 mW/cm <sup>2</sup> 300

**Tableau 2.1.** Paramètres du PV SP75

Pour les conditions initiales  $[i_L V_{PV} V_b] = x(0) = [-5 \ 12 \ 2]$ , les réponses du système via une commande  $u = 0.2$  sont montrées sur les figures (2.16)-(2.19).

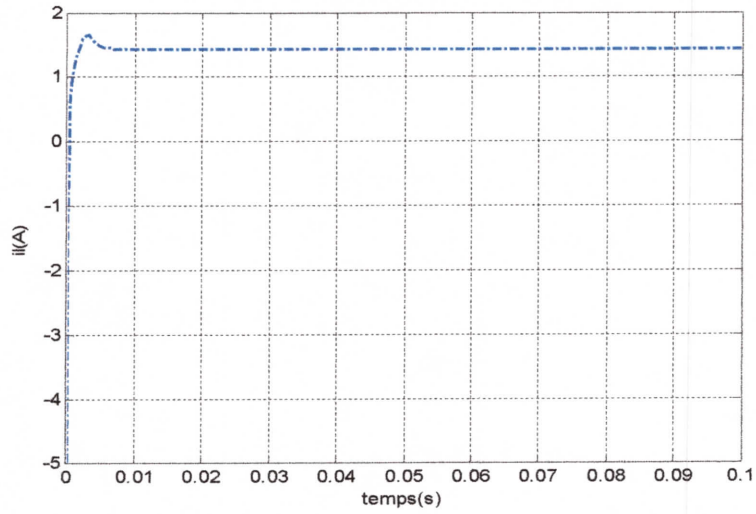


Figure 2.16. Réponse du système non linéaire :  $i_l(t)$

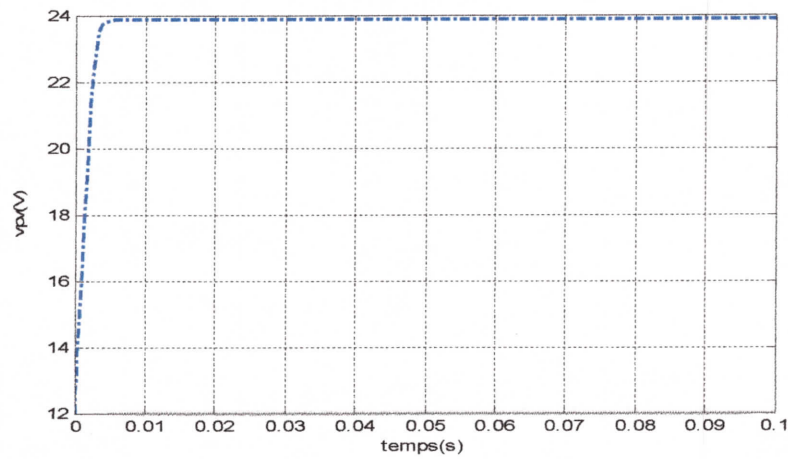


Figure 2.17. Réponse du système non linéaire :  $V_{pv}(t)$

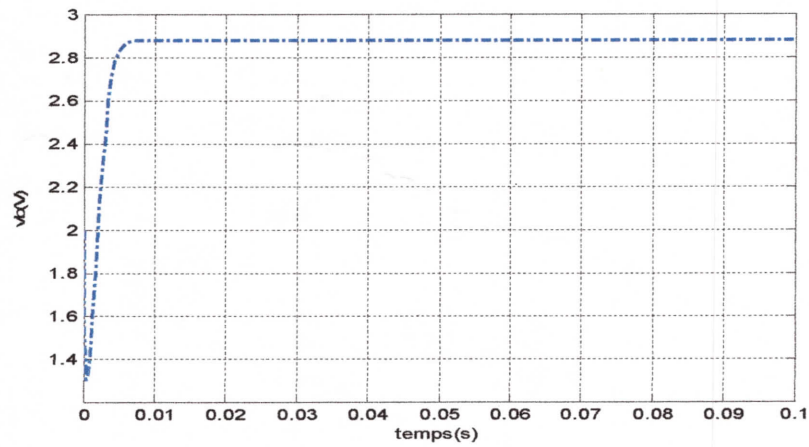
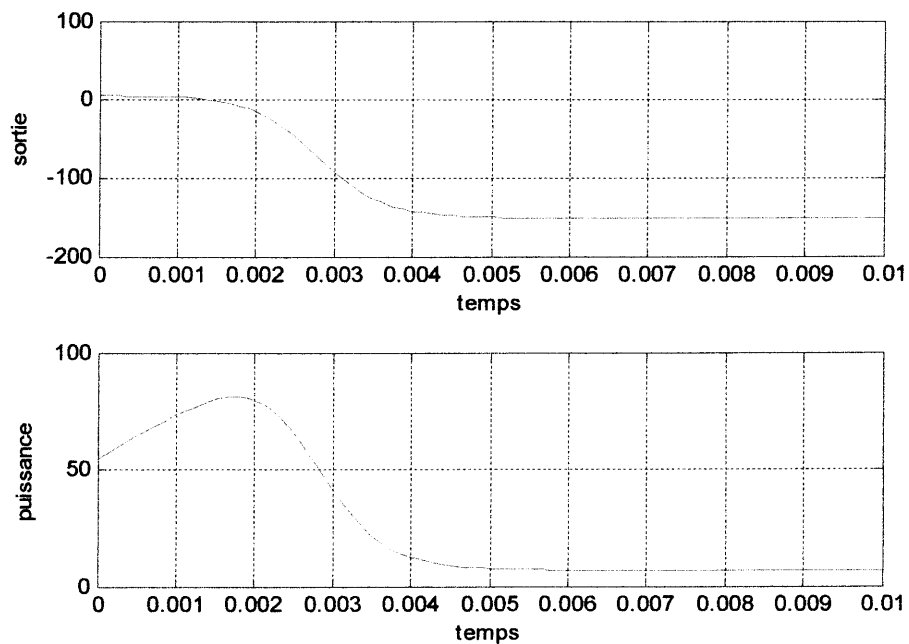


Figure 2.18. Réponse du système non linéaire :  $V_b(t)$



*Figure.2.19. Puissances et sa dérivée par rapport à la tension*

D'après les résultats de simulation (figure 2-19), notre système est stable. Cependant, la commande en BO n'arrive pas à maintenir en permanence le fonctionnement du système au point de fonctionnement optimal PPM.

## 2.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques du générateur PV. Par la suite, nous avons présenté l'analyse du système PV en boucle ouverte. On conclut que notre système est stable. Cependant, une commande en boucle ouverte est insuffisante pour rendre le fonctionnement du système en régime de fonctionnement maximal.





## Chapitre 3 :

# Représentation multi-modèle D'un système photovoltaïque

3.1. Introduction .....	30
3.2. Les multimodèles.....	30
3.3. Représentation multi-modèle.....	31
3.4. Différentes structures multimodèles.....	32
3.4.1. Structure découplée.....	33
3.4.2. Structure couplée.....	33
3.4.3. Structure hiérarchique.....	33
3.5. Modèles Flous de Takagi-Sugeno.....	33
3.6. Obtention des modèles de Takagi-sugeno.....	36
3.6.1. Par identification.....	36
3.6.2. Par linéarisation.....	36
3.6.3. Modélisation par l'approche des secteurs non linéaires.....	37
3.7. Représentation multimodèle du système PV avec convertisseur DC-DC.....	38
3.8. Validation du multimodèle.....	41
3.9. Conclusion.....	42

### 3.1. Introduction

L'automatique repose sur la notion de systèmes, représentant un ensemble d'objets ou de phénomènes liés entre eux et isolés artificiellement du monde extérieur. L'un des enjeux de l'automatique est de proposer un contrôleur adapté au système à piloter garantissant la réalisation de la tâche souhaitée. De nombreuses approches, pour les systèmes continus, ont été proposées pour la synthèse de lois de commande et peuvent être classées en deux catégories dites « linéaires » ou « non linéaire ».

Les modèles linéaires sont largement utilisés dans l'étude d'un grand nombre des systèmes rencontrés dans la pratique. Ils représentent un compromis entre la complexité de modélisation du système et la simplicité de la conception des lois de commande. Cependant, de tels modèles ne permettant la représentation du comportement d'un système qu'autour d'un point de fonctionnement donné. La conception des lois de commande des systèmes de nature non linéaire sur la base des modèles linéaires fournissent des performances dégradées dès qu'on s'éloigne du point de fonctionnement. Donc, la prise en considération des non-linéarités est plus que nécessaire dans la phase de modélisation. Les systèmes de commande élaborés sont alors plus performants que ceux développés à partir des modèles linéaires. L'inconvénient principal des modèles non linéaires est la complexité de leurs structures au point de vue mathématique qui les rend difficilement exploitables. Le dilemme réside alors entre la fidélité du modèle à décrire le comportement réel du système et l'adéquation de ce modèle à une forme mathématique exploitable. L'approche, dite multimodèle, permet de fournir une représentation efficace du système non linéaire sous forme d'interpolation entre des modèles linéaires invariants (modèles locaux) valide dans une zone de fonctionnement. Sa capacité à approcher le comportement dynamique du système réel très complexe par une structure simple basée sur des modèles linéaires a été largement reconnue [13].

### 3.2. Les multimodèles

C'est un ensemble de sous modèles (modèle locaux) agrégés par un mécanisme d'interpolation permettant de caractériser le comportement dynamique global d'un système.

Ces modèles permettent de représenter de manière précise un système non linéaire par une structure simple en se basant sur des modèles linéaires interpolés entre eux par des fonctions non linéaires positives et bornées.

Dans la littérature, deux grandes familles des multimodèles sont recensées selon l'utilisation du vecteur d'état : les multimodèles à état unique (couplé) et les multimodèles à état découplé.

### 3.3. Représentation multi-modèle

Les processus physiques sont très souvent représentés par des modèles décrits sous la forme d'une représentation d'état sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t), u(t)) \\ y = h(x(t)) \end{cases} \quad (3.1)$$

où  $(x)$  représente les variables d'état décrivant l'état interne du système,  $u(t)$  et  $y(t)$  sont respectivement les grandeurs d'entrée et de sortie du système et  $f$  et  $h$  représentent les fonctions linéaires et/ou non linéaires.

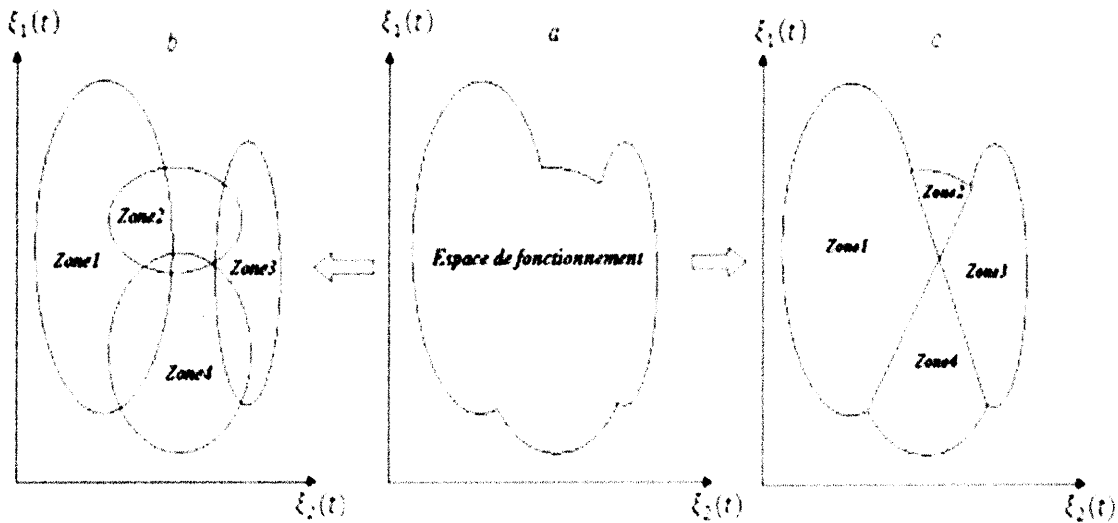
Un multimodèle se caractérise par les paramètres suivants :

➤ **Espace de fonctionnement:**

C'est un espace vectoriel à l'intérieur duquel les variables du système évoluent.

➤ **Zone de fonctionnement**

Les zones de fonctionnements représentent les domaines de validité des modèles locaux, chaque domaine est défini autour d'un point de fonctionnement. Ces domaines peuvent être de validité disjoints ou bien avec recouvrement comme l'indique dans la figure (3.1).



**Figure.3.1.** Schéma de principe de zone de fonctionnement de validité de modèles locaux a)- Zones de fonctionnement b)-Domaine de validité disjoints c)- Domaine de fonctionnement avec recouvrement.

Notons que, dans le cas où le domaine est de validité disjoint, les fonctions d'activation ne peuvent prendre que des valeurs 0 ou 1 et à un instant donné, il n'y a qu'un seul modèle qui

est valable et les autres sont nulles. Ce type de partitionnement est fréquent dans le cas des systèmes à configurations multiples ou à plusieurs modes de fonctionnement.

➤ **Sous-modèle**

C'est le modèle qui représente le comportement du système non linéaire dans une zone de fonctionnement spécifique.

➤ **Variable de prémisse**

Appelée aussi variable de décision  $z(t)$ , est une variable vectorielle caractéristique du système intervenant dans les fonctions de pondération  $\mu(t)$ . Cette variable peut englober une ou plusieurs variables internes ou externes du système. Ces variables peuvent être soit accessibles à la mesure comme des variables d'états mesurables ou bien des signaux d'entrée.

➤ **Fonction d'activation**

C'est une fonction qui détermine le degré d'activation du sous modèle local associé. Selon la zone où évolue le système, cette fonction indique la contribution plus ou moins importante du modèle local correspondant dans le modèle global. Elle assure un passage progressif de ce modèle aux modèles locaux voisins. Ces fonctions dépendent des variables de décision.

Les fonctions d'activation peuvent être construites soit à partir des fonctions à dérivées discontinues (des fonctions triangulaires ou trapézoïdales), soit à partir des fonctions à dérivées continues (des fonctions gaussiennes). Elles sont choisies de façon à vérifier les propriétés de somme convexe suivantes :

$$\begin{cases} 0 \leq \mu_i(z(t)) \leq 1 \\ \sum_{i=1}^n \mu_i(z(t)) = 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

### 3.4 Différentes structures multimodèles

On peut énumérer différentes formes de multimodèles selon que l'on fait la segmentation sur l'entrée ou, sur la sortie. et aussi selon la nature du couplage entre les modèles locaux associés aux zones de fonctionnement. Cependant, on peut noter trois structures de multimodèles [14] :

1. Structure couplée,
2. Structure découplée,
3. Structure hiérarchisée



### 3.4.1 Structure découplée

La deuxième famille c'est la structure découplée ou bien les multimodèles locaux, elle est proposée par Files en 1991 où il ya plusieurs vecteurs d'états. Elle suppose que le processus est composé de modèles locaux découplés et admet des vecteurs d'états indépendants, et peut être vue comme la connexion parallèle de  $r$  modèles affines pondérés par leurs poids de pondération. Dans le contexte d'identification des paramètres cette structure est très utile car elle permet d'ajuster les dimensions des sous-modèles à la complexité des différents comportements d'un processus.

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x_i(t) + B_i u(t)) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) \end{cases} \quad (3.3)$$

où

$x(t) \in R^n$  représente le vecteur d'état du modèle,  $u(t) \in R^m$  le vecteur des entrées et  $y(t) \in R^p$  le vecteur des sorties. Les matrices  $A_i \in R^{n \times n}$ ,  $B_i \in R^{n \times m}$ ,  $C_i \in R^{n \times p}$ . Cette structure est la plus utilisée en analyse bien qu'en synthèse des systèmes non linéaires.

### 3.4.2 Structure couplée

La structure couplée, où le vecteur d'état étant une somme pondérée des états des modèles locaux, s'appelle aussi le modèle flou de Takagi-Sugeno (Fuzzy T-S model), qui a été proposé par Takagi-Sugeno en 1985, et elle est basée sur des règles du type SI prémisses. Alors conséquence, dans cette situation la représentation multimodèle est obtenue par interpolation de  $r$  modèles locaux linéaires.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

### 3.4.3 Structure hiérarchique

Dans cette approche l'objectif est de décrire différents niveaux de procédé et de supervision dans lesquels un niveau particulier ( $i$ ) permet de prendre des décisions à partir d'informations issues du niveau ( $i-1$ ). Grâce à un retour d'informations vers le niveau ( $i-1$ ), le niveau ( $i$ ) doit également permettre de contraindre le comportement de celui-ci. L'objectif est d'obtenir ainsi des modèles de niveau ( $i$ ) beaucoup plus concis que ceux du niveau ( $i-1$ ).

## 3.5. Modèles Flous de Takagi-Sugeno

Les modèles flous de type Takagi-sugeno sont représentés dans l'espace d'état par des règles floues de type <<Si \_Alors>>. Les parties prémisses de ces règles floues sont



représentatives de l'univers du discours sur lequel le modèle flou est valide et, les parties conclusions correspondent à des modèles locaux invariants dans le temps (représentations d'état linéaires). A titre d'exemple, ce type de modèle flou s'avère utile pour la représentation des systèmes non linéaires tels que les systèmes électriques, chaotique, etc [15].

La  $i^{\text{ème}}$  règle floue d'un modèle T-S (par exemple dans le temps continu) s'écrit alors sous la forme :

$R^i$  Si  $z_1(t)$  est  $F_1^i(z_1(t))$  ET  $z_2(t)$  est  $F_2^i(z_2(t))$ ..... $z_p(t)$  est  $F_p^i(z_p(t))$

alors

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y_i(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

où  $R^i$  représente la  $i^{\text{ème}}$  règle floue,  $i=1, \dots, r$ ,  $F_j^i(z_j(t))$  pour  $j=1, \dots, r$  sont les sous-ensembles flous,  $r$  le nombre de règles floues,  $z_j(t)$  sont les variables de prémisses qui dépendent de l'entrée et/ou de l'état du système,  $x(t) \in R^n$ ,  $y(t) \in R^q$ ,  $u(t) \in R^m$  représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur de sortie et le vecteur de commande.

$A_i \in R^{n \times n}$ ,  $B_i \in R^{n \times m}$ ,  $C_i \in R^{q \times n}$ ,  $D_i \in R^{q \times m}$  sont des matrices décrivant la dynamique du système.

A chaque règle  $R^i$  est attribué un poids noté  $w_i(z(t))$ . Ce poids dépend du degré d'appartenance des variables de prémisses  $z_j(t)$  aux sous-ensembles flous,  $F_j^i(z_j(t))$  et du connecteur <<ET>> reliant les prémisses choisi telles que :

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p F_j^i(z_j(t)). \quad i = 1, \dots, r \quad (3.6)$$

Puisque les fonctions d'appartenance prennent leur valeur dans l'intervalle [0,1], donc :

$$\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) = 1 \quad (3.7)$$

A partir des poids attribués à chaque règle, les sorties finales de modèles flous (3.5) sont obtenues de la manière suivante :

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (3.8)$$

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(C_i x(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}$$

Qui peuvent être réécrites :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (3.9)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(C_i x(t))$$

avec :  $\mu_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}$  vérifiant une propriété de somme convexe, c'est-à-dire :

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) = 1 \text{ et } w_i(z(t)) \geq 0 \text{ pour tout } t.$$

Finalement, la défuzzification du modèle flou permet d'obtenir la représentation d'état d'un modèle non linéaire par l'interconnexion de modèles locaux invariants dans le temps par des fonctions d'activation non linéaires, on obtient alors :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(C_i x(t)) \end{cases} \quad (3.10)$$

La figure (3.2) illustre le schéma détaillé d'un modèle T-S standard. Notons que, les modèles flous de type Takagi-Sugeno sont considérés comme une structure mathématique intéressante de point de vue de l'automatique. En effet, ils permettent de diminuer la complexité d'un problème non linéaire à traiter (stabilité, stabilisation, observation, diagnostic, etc.). En le décomposant en un ensemble de problèmes linéaires locaux. L'ensemble des solutions locales correspond à ces dernier constitue alors la solution globale du problème non linéaire initial.

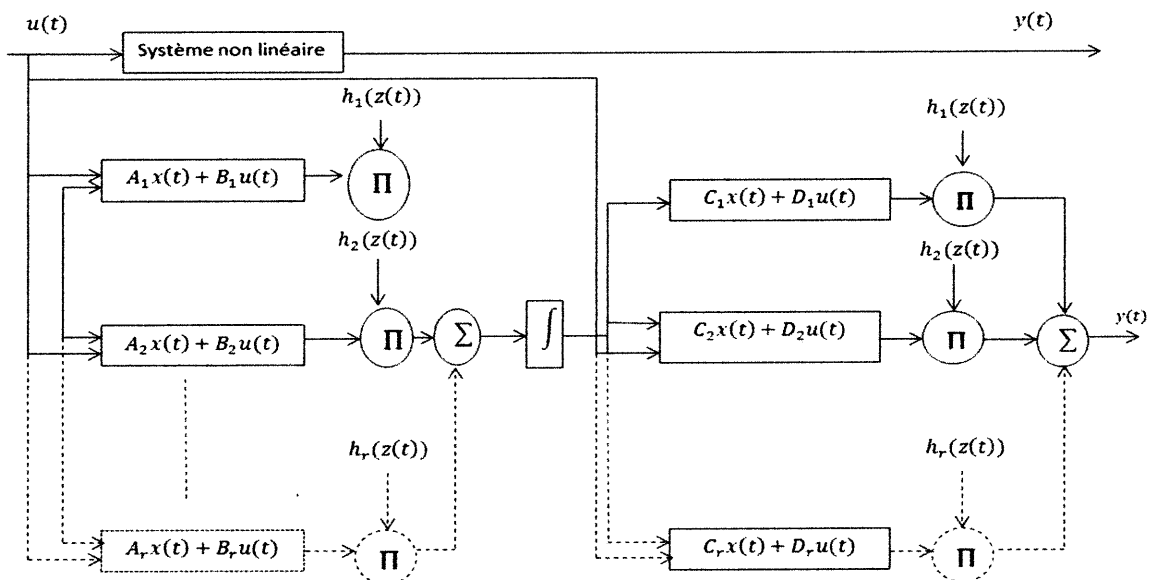


Figure 3.2 : Structure et implémentation d'un modèle T-S

### 3.6. Obtention des modèles de Takagi-Sugeno

Dans la littérature, il existe trois approches permettant le passage d'un modèle non linéaire affine en le commande à un modèle T-S. Ces approches visent à représenter les systèmes non linéaires complexes sur un large domaine de fonctionnement [15]. Selon le système étudié et l'objectif souhaité (commande, simulation, prédiction...), différentes approches sont proposées :

#### 3.6.1. Par identification

Les mesures acquises sur les entrées et les sorties du système permettent l'identification des paramètres des modèles locaux autour des différents points de fonctionnement préalablement définis. Dans ce cas, le problème d'identification du modèle non linéaire se réduit à l'identification des modèles locaux (sous-modèles) LTI (Linear Time Invariant). Notons que, cette méthode est souvent utilisée dans le cas des systèmes dotés une dynamique difficile à décrire à l'aide d'un modèle analytique [15].

Généralement, la forme retenue des modèles T-S est le suivant :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (3.11)$$

#### 3.6.2 Par linéarisation

Le principe de cette méthode consiste à linéariser le système non linéaire autour d'un ensemble fini de point de fonctionnement judicieusement choisis, conduisant à un nombre défini de modèle LTI. L'obtention d'un représentant T-S dans ce cas, est réalisé par l'interconnexion de ces modèles LTI à l'aide des fonctions d'appartenance non linéaires judicieusement choisies (gaussiennes, triangulaires, trapézoïdales, etc.) [14].

Considérons le système non linéaire suivant :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (3.12)$$

avec  $f(t) \in C^1$ . La linéarisation du système (3.6) autour d'un point de fonctionnement arbitraire  $(x_i, u_i) \in R^n \times R^m$  est :

$$\dot{x}(t) = A_i(x(t) - x_i) + B_i(u(t) - u_i) + f(x_i, u_i) \quad (3.13)$$

Que l'on peut réécrire sous la forme

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + d_i \quad (3.14)$$

avec

$C^1$  : ensemble des fonctions continûment dérivable.

$$A_i = \frac{\partial f(x,u)}{\partial x} \Big|_{\substack{x = x_i \\ u = u_i}}, \quad B_i = \frac{\partial f(x,u)}{\partial u} \Big|_{\substack{x = x_i \\ u = u_i}}, \quad d_i = f(x_i, u_i) - A_i x_i - B_i \quad (3.15)$$

En supposant que les modèles locaux sont issus d'une linéarisation autour de  $n$  points de fonctionnement  $(x_i, u_i)$ , la formulation de T-S aboutit à :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (3.16)$$

Dans ce cas, le nombre de modèles locaux ( $r$ ) dépend de la précision de modélisation souhaitée, de la complexité des systèmes non linéaires et de choix de la structure des fonctions d'activation.

### 3.6.3 Modélisation par l'approche des secteurs non linéaires

Le principe de celle-ci est basé sur une transformation polytopique convexe des termes non linéaires d'un système dynamique. Autrement dit, cette méthode consiste à trouver un secteur tel que [16] :

$$a_1 x \leq f(x(t), u(t)) \leq a_2 x$$

Cette méthode garantit la construction d'un modèle T-S représentant exactement un modèle non linéaire sur un espace compact des variables d'état. Notons que, l'approche par secteur non linéaire permet d'associer une infinité de modèles T-S pour un système non linéaire suivant le découpage de non-linéarités réalisé. Une approche systématique de découpage en secteurs non linéaires repose sur le lemme suivant :

#### Lemme 3.1 [16] :

Soit  $f(x(t)) : R \rightarrow R$  une fonction bornée, il existe toujours deux fonctions  $w_1(x(t))$  et ainsi  $w_2(x(t))$  ainsi que, deux scalaires  $\alpha$  et  $\beta$  tels que :

$$f(x(t)) = \alpha \times w_1(x(t)) + \beta \times w_2(x(t)) \quad (3.17)$$

avec

$$w_1(x(t)) + w_2(x(t)) = 1, \quad w_1(x(t)) \geq 0 \text{ et } w_2(x(t)) \geq 0 \quad (3.18)$$

**Preuve :**

Sous l'hypothèse que la fonction  $f(x(t))$  est bornée telle que  $\alpha \leq f(x(t)) \leq \beta$ , il est possible d'écrire :

$$f(x(t)) = \alpha \times w_1(x(t)) + \beta \times w_2(x(t)) \quad (3.19)$$

avec :

$$\alpha = \max(f(x(t))), \quad \beta = \min(f(x(t))), \quad w_1(x(t)) = \frac{f(x(t)) - \beta}{\alpha - \beta} \text{ et } w_2(x(t)) = \frac{\alpha - f(x(t))}{\alpha - \beta}$$

Dans ce cas, le modèle T-S (3.10) obtenu représente de façon exacte le modèle non linéaire (3.12) pour  $x \in R^n$  et comporte  $2^nl$  modèles locaux où  $nl$  correspond au nombre de non linéarités du modèle (3.11).

Quand les bornes de la fonction continue  $f$  est imposée (contrainte). Alors, dans ce cas, le modèle T-S obtenu ne peut être exact que sur le compact correspondant à ces limites dans l'ensemble des variables d'état [17].

### 3.7. Représentation multimodèle du système PV avec convertisseur DC-DC

Le but de cette section est d'écrire le comportement du système PV avec un convertisseur (2.15) par un modèle de T-S.

Le système non linéaire défini par (2.15) (voir chapitre 2) peut être réécrire sous la forme suivante:

$$\dot{x} \equiv A(x)x + B(x)u + B_0 b_d \quad (3.20)$$

$$y = C(x)x$$

avec

$$A(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}(R_L + R_b i_b) & 0 & -1/L \\ 0 & \frac{1}{C_a} G_a & 0 \\ \frac{1}{C_b} i_b & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } B(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L}(V_D + V_{PV}) \\ -\frac{1}{C_a} i_L \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } B_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad b_d = \left( -\frac{V_D}{L} \right)$$

$$C(x) = \left[ 0 \left( G_a - \left( \frac{n_p K_{PV}}{n_s} \right) i_{rs} e^{-\frac{PV V_{PV}}{n_s}} \right) \quad 0 \right]$$

Selon les termes non linéaires associés à ce modèle, nous avons choisi les variables de décisions suivantes :



$$\begin{aligned} z_1(t) &= i_b \\ z_2(t) &= i_L \\ z_3(t) &= G_a \\ z_4(t) &= V_{PV} \\ z_5(t) &= (n_p K_{PV} / n_s) i_{rs} e^{K_{PV} V_{PV} / n_s} \end{aligned}$$

En supposons que ces termes sont bornés comme suit :

$$d_1 \leq z_1(t) \leq D_1$$

$$d_2 \leq z_2(t) \leq D_2$$

$$d_3 \leq z_3(t) \leq D_3$$

$$d_4 \leq z_4(t) \leq D_4$$

$$d_5 \leq z_5(t) \leq D_5$$

En utilisant la méthode secteur non linéaire (voir section 3.6.3), on donne pour chaque variable de décision deux sous ensembles flous définis comme suit :

$$S_{aj} = -\frac{d_j}{D_j - d_j} + \left(\frac{1}{D_j - d_j}\right) z_j(t) \quad , S_{bj} = 1 - S_{aj} \quad (3.21)$$

où

$$D_j \equiv \max_{\bar{x} \in \Omega} z_j(t) \text{ et } d_j \equiv \min_{\bar{x} \in \Omega} z_j(t) \text{ pour } j=1-5.$$

Le modèle global de T-S est obtenu par l'interpolation entre 32 modèles locaux. Il est donné par :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^{32} \mu_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t) + B_0 b_d) \\ y(t) &= \sum_{i=1}^{32} \mu_i(z(t)) (C_i x(t)) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$h(t) = E x(t)$$

avec

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^5 F_{ij}(z_j(t))$$

$$\mu_i(z(t)) = w_i(z(t)) / \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \geq 0$$

$$\mu_i = \sum_{j=1}^5 \mu_i(z_j(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) + B_0 b_d$$

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}(R_L + R_b\theta_{1i}) & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{c_a}\theta_{3i} & 0 \\ \frac{1}{c_b}\theta_{1i} & 0 & 0 \end{bmatrix} B_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{L}(V_D + \theta_{4i}) \\ -\frac{1}{c_a}\theta_{2i} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } C_i = [0 \ \theta_{5i} \ 0] \quad (3.23)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Sachant que les paramètres  $F_{ji}$  et  $\theta_{ji}$  sont illustrés dans le tableau suivant :

Numéro de règle	Fonction d'activation ( $F_{1i}, F_{2i}, F_{3i}, F_{4i}, F_{5i}$ )	Sortie de system floue ( $\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}, \theta_{5i}$ ) <i>z<sub>1</sub> z<sub>2</sub> z<sub>3</sub> z<sub>4</sub> z<sub>5</sub></i>
1	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - D_5)$
2	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(D_1, D_2, D_3, d_4, D_3 - D_5)$
3	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(D_1, D_2, d_3, D_4, d_3 - D_5)$
4	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(D_1, D_2, d_3, d_4, d_3 - D_5)$
5	$(S_{a1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(D_1, d_2, D_3, D_4, D_3 - D_5)$
6	$(S_{a1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(D_1, d_2, D_3, d_4, D_3 - D_5)$
7	$(S_{a1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(D_1, d_2, d_3, D_4, d_3 - D_5)$
8	$(S_{a1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(D_1, d_2, d_3, d_4, d_3 - D_5)$
9	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(d_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - D_5)$
10	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(d_1, D_2, D_3, d_4, D_3 - D_5)$
11	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(d_1, D_2, d_3, D_4, d_3 - D_5)$
12	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(d_1, D_2, d_3, d_4, d_3 - D_5)$
13	$(S_{b1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(d_1, d_2, D_3, D_4, D_3 - D_5)$
14	$(S_{b1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(d_1, d_2, D_3, d_4, D_3 - D_5)$
15	$(S_{b1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(d_1, d_2, d_3, D_4, d_3 - D_5)$
16	$(S_{b1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(d_1, d_2, d_3, d_4, d_3 - D_5)$
17	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
18	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
19	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
20	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
21	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
22	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
23	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
24	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
25	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$



26	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$d_1(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
27	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$d_1(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
28	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$d_1(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
29	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$d_1(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
30	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$d_1(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
31	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$d_1(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
32	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{b5})$	$d_1(D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$

Tableau 3.1 : Tableau des règles floues

### 3.8. Validation du multimodèle

Les figures (3.3)-(3.5) illustrent les réponses du système non linéaire (3.20) et sa représentation multimodèle (3.22) en boucle ouverte ( $u = 0.2$ ) et pour l'état initial  $x(0) = [-5 \ 12 \ 0]$

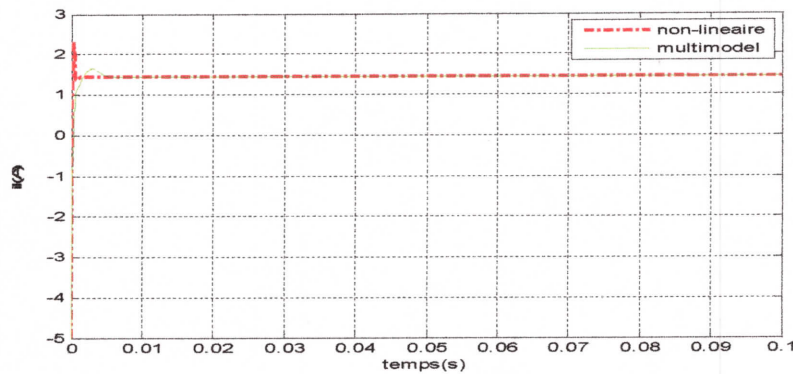


Figure 3.3. Réponses du système non linéaire et le modèle T-S :  $i(t)$

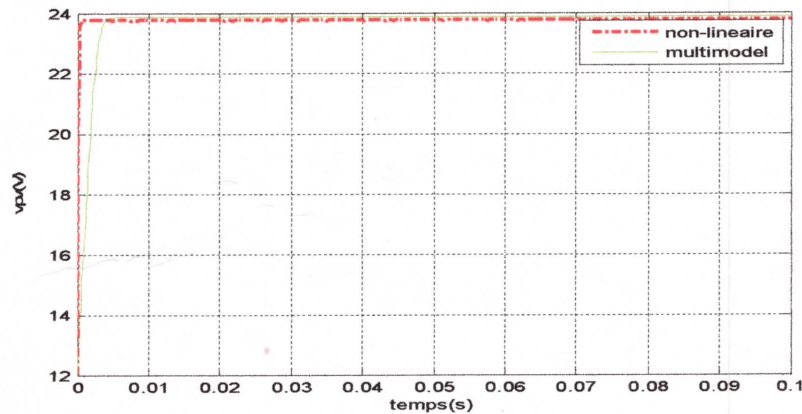


Figure 3.4. Réponses du système non linéaire et le modèle T-S :  $V_{pv}(t)$

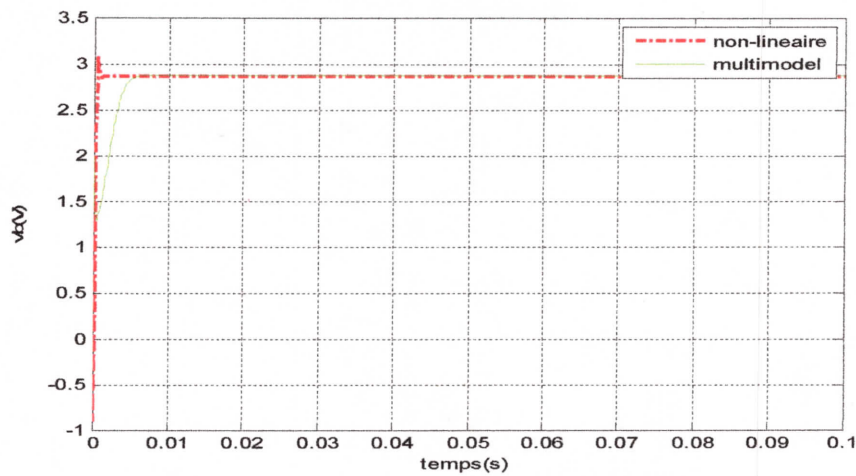


Figure 3.5. Réponses du système non linéaire et le modèle T-S :  $V_b(t)$


Malgré la complexité de ces systèmes dynamiques (fort non-linéarité, nombre élevé des règles floues), les résultats de simulation (voir figure (3.3)-(3.5)) montrent la capacité de l'approche multimodèle à approcher le comportement dynamique du système non linéaire.

### 3.9. Conclusion

Les systèmes flous de type T-S possèdent une propriété d'approximation universelle des systèmes non linéaires en la commande et présentent l'avantage de pouvoir représenter de manière exacte un modèle de connaissance non linéaire sur un compact de l'espace d'état. Ainsi, l'intérêt majeur de ce type d'approche est qu'elle permet d'étendre de nombreux concepts théoriques de l'automatique linéaire au cas des systèmes non linéaire [15].

Le résultat obtenu dans ce chapitre montre l'efficacité de cette représentation à décrire le comportement du système PV. Et par conséquent, elle peut être utilisée avec succès dans la conception de loi de commande.






# Chapitre 4 :

## Commande MPPT du système photovoltaïque

4.1. Introduction.....	43
4.2. Stabilité au sens de Lyapunov.....	43
4.3. Fonction de Lyapunov quadratique.....	43
4.4. Stabilité et stabilisation des modèles de type T-S.....	44
4.4.1. Stabilité des modèles T-S .....	44
4.4.1.1. Stabilité globale .....	44
4.4.1.2. Stabilité locale et stabilité globale .....	45
4.5. Inégalités Matricielles Linéaires (LMI) .....	46
4.6. Stabilisation par retour d'état des modèles T-S.....	48
4.6.1. Lois de commande PDC.....	48
4.7. Stabilisation du système PV.....	49
4.8. Poursuite de point maximale.....	51
4.9. Résultats de simulation.....	51
4.10. Conclusion.....	53





#### 4. 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude de la stabilisation du système PV. Le but de notre commande est de rendre le fonctionnement du système au voisinage du point de puissance maximale MPP. Les conditions de stabilisation issues sont basées sur loi de commande PDC est écrites en termes LMIs.

#### 4.2. Stabilité au sens de Lyapunov

La stabilité des systèmes non linéaires a fait l'objet de nombreux travaux. La théorie de Lyapunov, est l'outil fondamental. Le concept principal de cette théorie est basé sur l'idée que; s'il y a une fonction ayant forme énergétique soit dissipée dans le temps, alors elle tend vers un point d'équilibre. Dans ce contexte, l'utilisation de la fonction de Lyapunov est une mesure de distance entre les variables d'état et le point d'équilibre. L'idée de Lyapunov examiné la variation d'une fonction scalaire pour étudier la stabilité d'un système donné. L'énergie représentée par  $V(x(t))$  de l'état  $x$  du système. Le principal résultat de la théorie de stabilité de Lyapunov montre que pour un système autonome à temps continu  $\dot{x} = f(x)$  l'origine est un point d'équilibre globalement asymptotiquement stable, s'il existe une fonction positive vérifiant les conditions suivantes :

$$\begin{cases} V(x(t)) > 0, \forall x \neq 0 \\ \dot{V}(x(t)) < 0, \forall x(t) \in R^n \quad \text{et } x \neq 0, V(0) = 0 \\ V(0) = 0 \text{ et } \|x\| \rightarrow \infty, V(\infty) \rightarrow \infty \end{cases} \quad (4.1)$$

La théorie de Lyapunov donne des conditions suffisantes lors de l'étude de la stabilité des modèles T-S, dont le pessimisme dépend de la forme particulière imposée à une fonction  $V(x(t))$ .

#### 4.3. Fonction de Lyapunov quadratique

Cette classe de fonction joue un rôle très important dans l'étude de la stabilité et de la stabilisation des contrôleurs et/ou observateurs [18]. Et que l'on utilisera dans ce mémoire, et elle est de la forme :

$$V(x(t)) = x^T(t)Px(t) \quad (4.2)$$

avec

$$P = P^T > 0$$

#### 4.4. Stabilité et stabilisation des modèles de type T-S

Ces deux dernières décennies, le problème de la stabilité et de la stabilisation des systèmes non linéaires décrits par les modèles flous de type Takagi-Sugeno (T-S) était le sujet de plusieurs travaux de recherche grâce à leur simplicité et leur capacité de d'écrire le comportement non linéaire par une agrégation des modèles locaux linéaires.

Que ce soit pour l'analyse de la stabilité ou pour le calcul des lois de commande stabilisant un modèle T-S, l'approche basée sur la seconde méthode de Lyapunov reste, de loin, la plus utilisée [17]. Le principe de cette dernière est inspiré d'une réalité physique. En effet, si l'énergie d'un système est continûment dissipée, le système va atteindre son point d'équilibre. Un rappel sur la théorie de Lyapunov est donné dans la suite [15].

##### 4.4.1. Stabilité des modèles T-S

L'étude de la stabilité d'un modèle Takagi-Sugeno autonomes (4.5) permet d'établir si sa dynamique est intrinsèquement stable lorsqu'il n'est soumis à aucune excitation externe ( $u = 0$ ). Dans cette section, afin de permettre au lecteur d'appréhender les résultats proposés dans la suite de ce manuscrit, on présente les résultats significatifs, à l'origine des nombreux travaux sur la stabilité des modèles Takagi-Sugeno standard. Ceux-ci sont donnés sous forme d'Inégalités Matricielles Linéaires (LMI).

##### 4.4.1.1. Stabilité globale

Considérons le modèle Takagi-Sugeno continu de la forme [19] :

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (4.3)$$

avec

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) = 1 \quad (4.4)$$

Le modèle Takagi-Sugeno en boucle ouverte correspondant à (4.3) est

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))A_i x(t) \quad (4.5)$$

##### **Théorème 4.1**

Le modèle Takagi-Sugeno continu autonome (4.5) est asymptotiquement stable, s'il existe une matrice  $P = P^T > 0$ , telle que la LMI suivante est vérifiée pour  $i = 1, \dots, r$  :

$$A_i^T P + P A_i < 0 \quad (4.6)$$

**Preuve**

En considérant la fonction candidate quadratique de Lyapunov

$$V(x(t)) = x^T(t)Px(t) \quad (4.7)$$

Le modèle Takagi-Sugeno standard continu autonome (4.5) est stable si :

$$\dot{V}(x(t)) = \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) < 0 \quad (4.8)$$

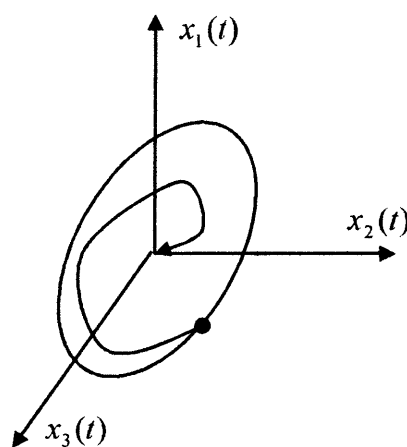
C'est-à-dire si:

$$\dot{V}(x(t)) = x^T(t)(\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i^T P + PA_i))x(t) < 0 \quad (4.9)$$

Qui est vérifiée si la condition suffisante du théorème (4.1).

**4.4.1.2. Stabilité locale et stabilité globale**

La notion de la stabilité au sens de Lyapunov est liée à celle de la région d'attraction, définie comme étant le grand domaine dans l'espace d'état dans lequel toute trajectoire qui y commence converge vers l'origine. Si un système est globalement asymptotiquement stable, alors la région d'attraction de l'origine est tout l'espace d'état [21]. La détermination exacte de cette région par la méthode analytique est une tâche difficile voire impossible [22]. Cependant, il est possible de déterminer des régions de stabilité asymptotique à partir du domaine de Lyapunov et l'ensemble positivement invariant.



**Figure 4.1.** Ensemble invariant dans le cas d'un système à trois dimensions.

#### 4.5. Inégalités Matricielles Linéaires (LMI)

Les inégalités matricielles linéaires sont utilisées pour résoudre plusieurs problèmes d'automatique, (problèmes d'optimisation en théorie du contrôle, identification de système,...) qui sont généralement difficiles à résoudre de façon analytique. L'intérêt des méthodes basées sur les LMIs vient du fait que ces dernières peuvent être résolues en utilisant la programmation convexe. Avec cette approche, on n'est plus limité aux problèmes ayant une solution analytique.

En résolvant ces inégalités, on obtient un domaine de solutions faisables, c'est-à-dire des solutions satisfaisant ces LMIs, plus vaste que celui généré par la recherche de solutions analytiques. En utilisant le fait qu'une inégalité possède davantage des solutions qu'une équation, il est possible d'employer les degrés de liberté supplémentaires pour inclure d'autres objectifs que ceux initialement retenus.

Les notions des LMIs se retrouvent dans plusieurs travaux depuis de nombreuses années. Ainsi, Lyapunov a conditionné la stabilité d'un système par LMI. Plus tard, Kalman, Yakubovich et Popov ont généralisé le résultat de stabilité proposé par Lyapunov. La terminologie des LMIs a été utilisée par Willems en 1971. En 1994, Nesterov et Nemirovski ont trouvé une solution pour résoudre les LMIs de manière efficace en utilisant des méthodes basées sur les points intérieurs.

**Définition 4.1** étant donnée une famille de matrices symétriques  $F_0$  et  $F_i, i \in I_n$  de  $R^{P.P}$  et un vecteur  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$  une LMI stricte en  $x_i, i \in I_n$  s'écrit sous la forme :

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^n x_i F_i > 0 \quad (\text{resp} \geq 0)$$

Remarquons que l'ensemble  $E$  défini par  $E = \{x \in R^n : F(x) > 0\}$  est convexe. Ce qui nous amène à considérer une contrainte LMI comme une contrainte convexe.

On distingue trois types de problèmes d'optimisation convexe rencontrée sous forme de LMI :

- **Problème de faisabilité**

Trouver un vecteur  $x$  tel que  $F(x) < 0$ . Ce problème est résolu généralement en cherchant le vecteur  $x$  minimisant le scalaire  $t$  tel que:

$$F(x) < t.I \tag{4.10}$$

Si la valeur minimale de  $(t)$  est négative alors le problème est faisable.

#### 4.6. Stabilisation par retour d'état des modèles T-S

Afin d'assurer la stabilité d'un modèle Takagi-Sugeno en boucle fermée, on réalise la synthèse d'une loi de commande adéquate. Plusieurs lois de commande floues ont été proposées dans la littérature. Les plus répandues se basent sur des lois de commande de type compensation parallèle distribuée (PDC, Parallèle Distributed Compensation). Notons, des variantes de ce type de loi de commande ont été également proposées dans la littérature, par exemple la PDC proportionnelle (PPDC) ou encore la loi de commande de type compensation et division pour modèles flous [15].

##### 4.6.1. Lois de commande PDC

La loi de commande PDC a l'avantage de considérer les mêmes prémisses que les règles floues contenues dans le modèle T-S à stabiliser. De ce fait, cela revient à considérer que, à chaque modèle local correspond une commande par retour d'état linéaire (voir figure 4.2) que l'on peut interpoler par les mêmes fonctions d'activation  $\mu_i(z(t))$  que celles du modèle T-S [15]. Notons que dans ce cas, lorsque le modèle flou obtenu par découpage est exact, c'est-à-dire par transformation polytopique convexe, alors cette loi de commande est valable sur tout l'espace compact des variables d'état sur lequel a été effectué le découpage. Ainsi, cette loi de commande est donnée par [17]:

$$u(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) K_i x(t) \quad (4.18)$$

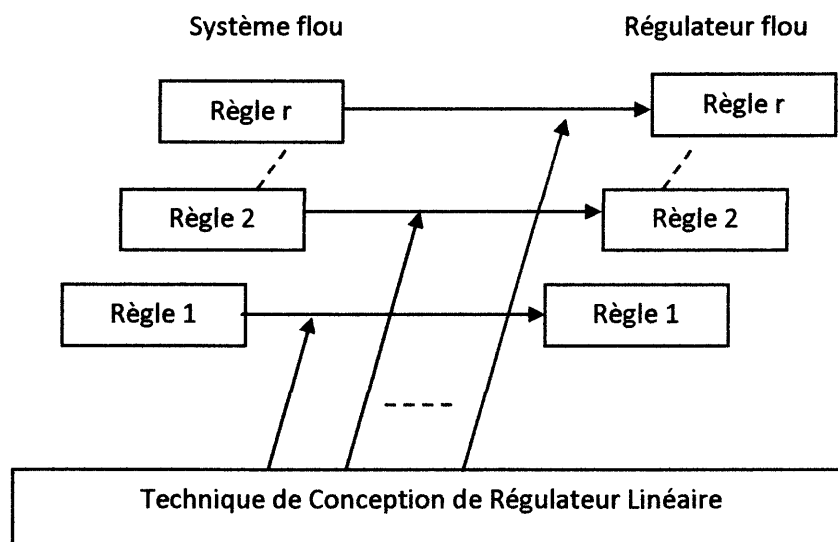


Figure 4.2. Représentation de concept PDC



4.7. Stabilisation du système PV

Soit le système non linéaire de PV décrit par le modèle T-S (3.22) (voir chapitre 3) et la loi de commande PDC (4.18).

Le système en boucle fermé peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i \mu_j x + B_0 b_d (A_i + B_i k_j)$$

$$= (A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu) x + B_0 b_d$$

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r (A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu) x + B_0 b_d$$

où

$$x \rightarrow (0)$$

$$\begin{cases} A_i^\mu = \sum \mu_i A_i \\ B_i^\mu = \sum \mu_i B_i \\ k_j^\mu = \sum \mu_i k_j \end{cases}$$

En utilisant la fonction de Lyapunov (4.7), on a :

$$\dot{V}(t) = x^T (A_i^\mu + B_i^\mu K_j^\mu) x + B_0 b_d]^T P x + x^T P [(A_i^\mu + B_i^\mu K_j^\mu) x + B_0 b_d]$$

$$= x^T [(A_i^\mu + B_i^\mu K_j^\mu) P + P (A_i^\mu + B_i^\mu K_j^\mu)] x + (B_0 b_d)^T P x + x^T P B_0 b_d < 0$$

Par l'utilisation de la relation suivante :

$$Y^T x + x^T Y < x^T x + Y^T Y$$

$$b(B_0^T P x) + x^T P B_0 b_d$$

si

$$V(x) = x^T [(A_i^\mu + B_i^\mu K_j^\mu) P + P (A_i^\mu + B_i^\mu K_j^\mu)] x + x^T P B_0 b_d + b_d b_d^T P < 0$$

alors

$$\dot{V}(x) < 0$$

En supposant

$$A_i^\mu + B_i^\mu K_j^\mu = \bar{A}_{ij}^\mu$$

on trouve :

$$x^T [\bar{A}_{ij}^{\mu T} P + P \bar{A}_{ij}^\mu + P B_0 B^T P] x + x^T Q x - x^T Q x + b_d^T b_d < 0$$

En tenant compte de la contrainte suivante :

$$A_i^\mu - \alpha \varphi x + b_d^T b_d > 0$$

$$- \alpha \varphi x > - b_d^T b_d$$

$$\alpha \varphi x < b_d^T b_d$$

$$x^T Q x \leq b_d b_d^T \tag{4.19}$$

alors :

$$x^T [A_{ij}^{\mu T} P + P A_{ij}^{\mu} + P B_0 B_0 P + \hat{Q}] x < 0$$

Ou bien sous la forme d'inégalité matricielle :

$$[A_{ij}^{\mu T} P + P A_{ij}^{\mu} + P B_0 B_0 P + \hat{Q}] < 0$$

Nous considérons  $P = X^{-1}$ , nous obtenons :

$$[A_{ij}^{\mu T} X^{-1} + X^{-1} A_{ij}^{\mu} + X^{-1} B_0 B_0 X^{-1} + \hat{Q}] < 0.$$

En multipliant à gauche et à droite la dernière contrainte par la matrice  $X$ , on trouve

$$X A_{ij}^{\mu T} + \overline{A_{ij}} X + B_0 B_0^T + X \hat{Q} X < 0$$

D'où les conditions de stabilisation suivantes :

$$X A_{ij}^{\mu T} + \overline{A_{ij}} X + B_0 B_0^T + X Q_1 X^{-1} Q_1 X < 0 \text{ pour } i = 1 \dots r \text{ et } j = 1 \dots r$$

avec :

$$\hat{Q} = Q_1 X^{-1} Q_1$$

On utilise le complément de Schur, les conditions de stabilisation issues peuvent être écrites sous la forme LMIs:

$$\begin{bmatrix} X A_{ij}^{\mu T} + \overline{A_{ij}} X + B_0 B_0^T & (X Q_1)^T \\ (X Q_1)^T & -X \end{bmatrix} < 0 \text{ pour } i = 1 \dots r \text{ et } j = 1 \dots r \tag{4.20}$$

$$X A_{ij}^{\mu T} + \overline{A_{ij}} X + B_0 B_0^T = X [A_i + B_i k_j]^T + [A_i + B_i k_j] X + B_0 B_0^T$$

En supposant :

$$M_j = k_j X$$

on a,

$$X A_{ij}^{\mu T} + \overline{A_{ij}} X + B_0 B_0^T = (A_i X + B_i M_j) + (X A_i + M_j B_i)^T + B_0 B_0^T$$

Si l'inégalité suivante est satisfaisante:

$$\min(\hat{Q}) x^T x \leq \|b_d\|^2$$

alors, la relation (4.19) est vérifiée.

#### 4.8. Poursuite de point maximal

Le système (3.22) doit être converger vers le point d'équilibre désiré  $q_d = (x_d, u_d)$ , pour lequel le système atteint son point maximal MPPT.

On suppose qu'il existe un système stable :

$$\dot{q}_d(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) \{ \overline{A}_{ij} q_d + \overline{B}_0 b_d \} \quad (4.21)$$

avec :

$$q(0) = q_d.$$

Le système (3.20) a la même dynamique du système (4.21). Par conséquent, s'il existe une commande stabilisante pour le système :

$$\dot{\check{q}}_d(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) \{ \overline{A}_{ij} \check{q}_d + \overline{B}_0 b_d \} \quad (4.22)$$

$$\check{q}_d = x(t) - q_d(t)$$

alors,  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = q_d$ . A ce moment, le problème de la poursuite du point maximal du système se transforme au problème de stabilisation du système (4.21). Par l'utilisation de la fonction de Lyapunov et la loi de commande PDC ( $u(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) K_j \check{q}_d$ ), les conditions de stabilisation sont similaires à celles données par les LMIs (4.20).

#### 4.9. Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont obtenus, en utilisant les paramètres montrés dans le tableau (2.1).

Le point maximal pour ce système est défini par MPP ( $V_{PV} = 14V, P_{PV} = 71w$ ).

Pour  $Q_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5 \end{bmatrix}$ , la résolution des contraintes (4.20) par Toolbox Matlab LMI, nous

donne les paramètres ci-dessous :

$$X = \begin{bmatrix} 0.1465 & 0.0006 & -0.0948 \\ 0.0006 & 0.0015 & 0.0070 \\ -0.0948 & 0.0070 & 0.1594 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = k_2 = \dots = k_{16} = [0.0032 \quad 0.4603 \quad -0.0096]$$

Les figures suivantes représentent les réponses du système non linéaire (2.15) en boucle fermée.

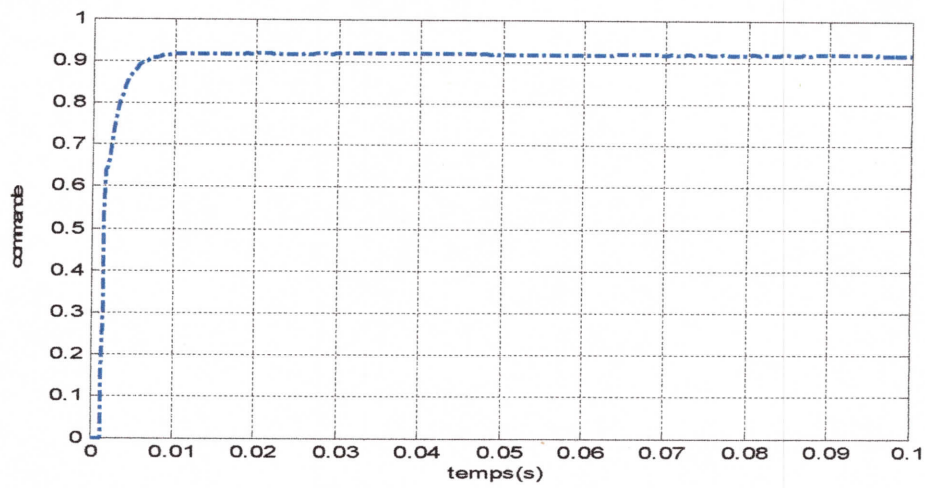


Figure 4.3. Trajectoire de la commande  $u(t)$ .

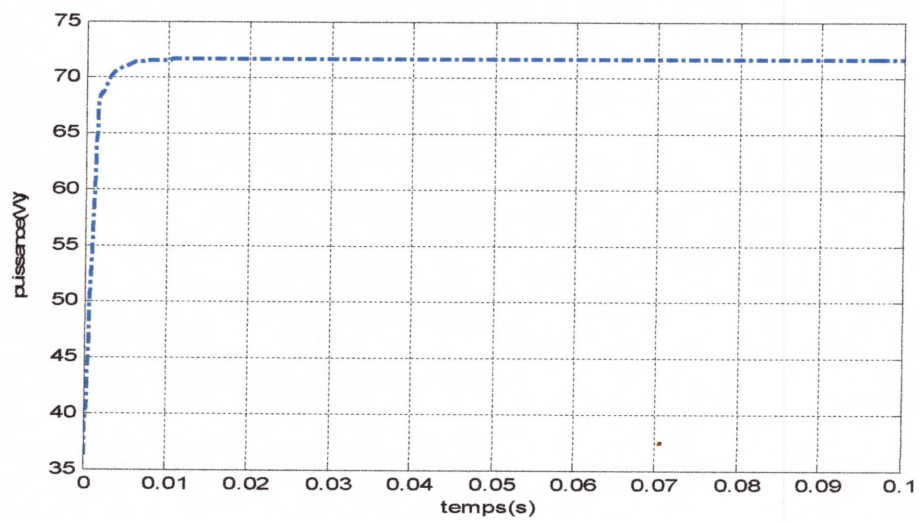


Figure 4.4. Trajectoire de la puissance  $P_{pv}(t)$ .

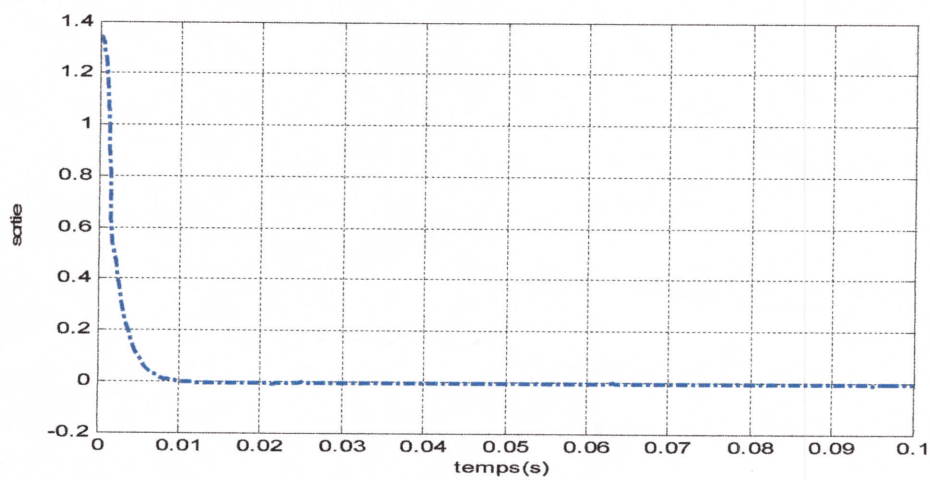


Figure 4.5. Variation de la dérivée de puissance  $y(t)$ .



D'après les résultats de simulation illustrés par les figures (4.4) et (4.5), le système atteint son régime de fonctionnement maximal qui montre l'efficacité de la loi de commande proposée.

#### 4.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les conditions de stabilisation du système PV. L'étude de la stabilité et de la stabilisation fait appel, à la méthode directe de Lyapunov. Les conditions obtenues sont écrites sous forme LMI. Et afin de suivre le point maximal, la commande MPPT est réalisée par la conception d'une loi de commande PDC. Finalement, les résultats de simulation sont exposés pour démontrer l'efficacité de la méthode proposée.



## Conclusion général

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques.

Le travail qu'on a présenté porte sur la modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Afin de réaliser une commande MPPT, premièrement, nous avons étudié les caractéristiques des systèmes PV avec et sans convertisseur DC-DC. Deuxièmement, nous avons donné une représentation multimodèle des systèmes PV avec convertisseur DC-DC. Par la suite, cette représentation a été utilisée dans la conception d'une loi de commande dit PDC permettant de maintenir le fonctionnement du système en mode de fonctionnement optimal.

Finalement, les résultats de simulation exposés montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques et l'efficacité de l'approche multimodèle à réaliser cette commande.

A la lumière d'analyse développée et les résultats obtenus, nombres perspectives pourront être dégagés pour le suivi de ce travail dont les principaux sont citées ci-dessous :

- La synthèse d'autres lois de commande telles que la loi de commande SOF (Static Output Feedback) et la loi de commande nonPDC-SOF, etc.
- La prise en considération le problème de limitation de la commande (le rapport cyclique est limité entre 0 et 1).
- La conception d'une loi de commande robuste afin de minimiser l'effet de perturbation (le courant de fuite des convertisseurs).

## Bibliographique

---

- [1] F Hananou. et A. Rouabha. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque, mémoire master académique, université kasdi merbah Ouargla 2014.
- [2] B. Denib. Technique conventionnelles est avancée de poursuit MPPT pour des applications photovoltaïque, Etude comparative, mémoire de magister, département d'électronique université ferhat abbes Sétif 2007.
- [3] J.Royer et Th. Djiako. Le pompage photovoltaïque, thèse de doctorat université, d'ottawa, 1998.
- [4] M. Blhadj. Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome, mémoire de magister centre universitaire de bechar 2008.
- [5] D. Brahimi (MEM). Situation des énergies renouvelables en algérie, conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marche, université d'Alger 2001.
- [6] K. Helali. Modélisation d'une cellule photovoltaïque. Etude comparative, mémoire de magister, université mouloud mammeri de Tizi –Ouzou 2012.
- [7] M.L.Louazane. Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla, mémoire de magister, université el hadj lakhdar-Batna 16/06/2008.
- [8] I.Bendjamaa. Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque, mémoire de magister, université abou-baker blkaid-Tlemcen 2011/2012.
- [9] M.N.Mchalikh et CH.Hmada. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau, mémoire de master université kasdi merbah–Ouargla 2013.
- [10] D. turcotte et M. ross et F. sherif. Photovoltaïque hybrid système sizing et simulation Tools, PV horizon, canada 2001.
- [11] S. fateh. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectés au réseau électrique, mémoire de magister, université farhat abbes Sétif 2011.

## Bibliographique

---

- [12] A.B. Ibarreta. Réalisation de commandes MPPT numériques, rapport de stage, projet fin d'études, université Rovira Virgili 2006.
- [13] S. Dounia. Commande des systèmes non linéaires avec contraintes sur l'entrée. thèse de doctorat, université de Jijel 2013.
- [14] M. Chadli. Stabilité et commande de synthèse d'écrits par des multimodèles, thèse de doctorat, institut national polytechnique de Lorraine, décembre 2002.
- [15] T. Bouarar. Contribution à la synthèse de lois de command par les descripteurs de type T-S incertains et perturbés, thèse de doctorat, université de Reims.08 décembre 2009.
- [16] Y. Morère. Mise en œuvre de lois de command pour les modèles flous de type T-S thèse de doctorat, université de valenciennes, 4 janvier 2001.
- [17] D. Khier. Modélisation et commande d'un moteur thermique à allumage Commandé, thèse de doctorat, université de Tizi-Ouzou, 04 mai 2007.
- [18] Tanaka, K., & Sano. M,A. Robust stabilization problem of fuzzy control systems and its application to backing up control of a truck-trailer. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 2 février 1994, 119-134.
- [19] B. Mansouri. Contribution à la synthèse de lois de commande en poursuite de trajectoire pour les systèmes flous de type Takagie-Signo incertains, thèse de doctorat. université de Reims. 9 Décembre 2005.
- [20] Ch. Song Ch. member, IEEE: T-S fuzzy maximum power point tracking control of solar power generation systems.25 November- 4 December 2010.
- [21] D. Henion. Stabilité des systèmes linéaires incertains avec commande contrainte, thèse de Doctorat, université de toulouse, Octobre 1999
- [22] J.M. Gomes Da Silva. Sur la stabilité locale des systèmes avec saturation de commandes, thèse de doctorat, université de toulouse, Octobre 1997.
- [23] D. Peaucelle. Formulation générique de problèmes en analyse et commande robuste par les fonctions de Lyapunov dépendant des paramètres, Thèse de doctorat, université Paul Sabatier-Toulouse 3, 2000.

# ANNEXE

## ANNEXE A

### A.1. Logique floue

La logique floue est à l'image de logique binaire, clairement et logiquement étayée à l'aide de théorie mathématique. Elle est apparue en 1965 avec la publication par LOTFI ZADEH d'un article intitulé «les ensembles flous».

La logique floue permet de manipuler des symboles et d'inférer des actions en utilisant des règles logiques à partir des prémisses imprécises ou incertaines.

En 1975 Mamdani a développé à partir de quelques principes de la logique floue une stratégie de contrôle de procédé, par la suite ces travaux ont été repris, et les techniques utilisées dans les réalisations récentes sont issues.

### A.2. La structure d'un système flou

La structure conventionnelle d'un système floue est présentée par figure (1), elle est composée de quatre blocs distincts dont les définitions sont données ci-dessous :

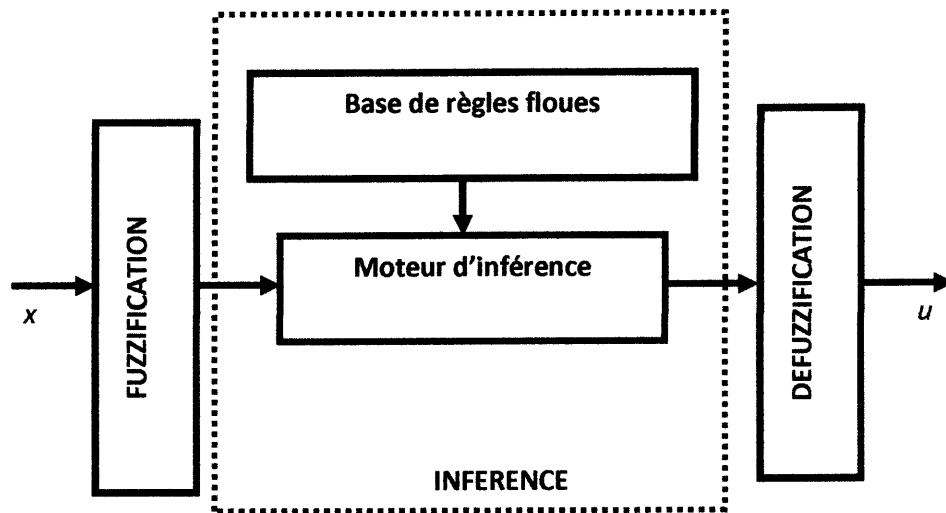


Figure (1) structure de base d'un système flou.

### A.3. Fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du système flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert.

## A.4. Base de règles floues

Les règles floues représentent le cœur du système, elle rassemble l'ensemble des règles floues de type «Si-Alors» décrivant en termes linguistiques basés sur la connaissance d'un expert le comportement dynamique du système.

$R_i$ : Si  $x_1$  est  $A_1^i$  et ... et  $x_n$  est  $A_n^i$  Alors  $u_i$  est  $B^i$

Avec :  $(x_1, \dots, x_n)$  et  $u_i$  sont respectivement les entrées et la sortie du système floue.

## A.5. Moteur d'inférence

L'inférence floue est le processus de formulation de la relation entre les entrées et les sorties par logique floue. Cette relation offre une base avec laquelle la décision est prise par le système flou. L'inférence floue fait appel alors aux concepts expliqués dans les sections précédents. A savoir: Fonctions d'appartenance, les opérateurs flous et les règles floues.

Nous distinguons une variété importante d'inférences floues, L'inférence de Max-Min (mamdani), Max-produit, Somme-produit et de Sugéno.

Les quatre inférences diffèrent par la manière de déterminer des sorties. Pour le réglage par logique floue, on utilise en généralement la méthode suivante :

## A.6. Défuzification

Pour avoir à la sortie du système flou un signal précis, il faudra donc transformer la fonction d'appartenance résultante obtenue à la sortie du moteur d'inférence en une valeur précise. Cette opération est appelée défuzification. Parmi les méthodes utilisées on peut citer : la méthode de la hauteur, la méthode de la hauteur modifiée, la méthode de la valeur maximum ainsi que le centre de gravité que l'on a l'utiliser dans ce travail.

## A.7. Développement du modèle de Takagi-Sugéno

Soit  $x = [x_1, \dots, x_n]^T$  l'entrée du système flou,  $y$  la sortie, le système est représenté par l'ensemble des règles suivantes :

$$R_k : \text{si } x_1 \text{ est } \tilde{A}_1^k \text{ et } \dots \text{ et si } x_n \text{ est } \tilde{A}_n^k \text{ alors } y = f_k(x) \quad (1)$$



## ANNEXE A

avec  $(k=1, \dots, N)$ . Pour chaque  $x_i$  associé  $m_i$  ensembles flous  $\tilde{A}_i^j$  dans  $X_i$ , tel que pour  $x_i \in X_i$  il existe au moins un degré d'appartenance  $\mu_{\tilde{A}_i^j}(x_i) \neq 0$  où  $i=1, \dots, n_i$  et  $j=1, \dots, m_i$  la base de règles du système flou comporte  $N$  règles.  $f_k(x)$  est une fonction numérique dans l'espace de sortie, elle peut être une fonction polynomiale en fonction des variables d'entrées, comme elle peut prendre le rôle d'une fonction arbitraire tant qu'elle puisse décrire convenablement le comportement du système étudié. Prenons le cas où  $f_k(x)$  est linéaire :

$$f_k(x) = a_0^k + \sum_{i=1}^n a_i^k x_i \quad (2)$$

Il s'agit dans ce cas d'un système flou de Takagi-Sugeno d'ordre un (TS1) pour  $f_k(x) = a_0^k$  c'est un système d'ordre zéro (TS0), la sortie totale  $y(x)$  du système flou est obtenue directement sans passer par la défuzzification en calculant la moyenne pondérée suivante :

$$y(x) = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_k(x) \cdot f_k(x)}{\sum_{k=1}^N \mu_k(x)} \quad (3)$$

Le degré de confiance ou d'activation de la règle  $R_k$  est représentée par :

$$\mu_k(x) = \prod_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}_i^k}(x_i), \quad \tilde{A}_i^k \in \left\{ \tilde{A}_i^1, \dots, \tilde{A}_i^{m_i} \right\} \quad (4)$$

On peut simplifier la sortie à :

$$y(x) = w^T(x) \cdot \theta \quad (5)$$

Avec  $\theta = [a^1, \dots, a^N]^T$  : Vecteur constitué des paramètres de la partie conclusion des règles floues  $w(x) = [w_1(x), \dots, w_N(x)]^T$  : Vecteur des fonctions floues de base, ou chacune des composantes est donnée par :

$$w_k(x) = \frac{\mu_k(x)}{\sum_{k=1}^N \mu_k(x)}, \quad k=1, \dots, N \quad (6)$$