

**Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique**

**Université Djilali BOUNAAMA Khemis Miliana**

**Faculté des Sciences Et de la Technologie**

**Département de Génie Electrique**



Mémoire du projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de

**Master**

En "Automatique"

**Option** : "Automatique et informatique industrielle"

**Titre :**

---

**Mise en œuvre FPGA générique  
reconfigurable d'un contrôleur à logique  
floue pour MPPT de systèmes PV**

---

**Réalisé Par :**

NEKKAZ Djallel

BOUBEHA Abdellatif

**Encadreur :**

Dr. TIDJANI Naoual

**Membres de jury :**

Mr. IKNI Samir

Dr. CHOUYA Ahmed

**Année Universitaire: 2022/2023**

## **REMERCIEMENTS**

Avant tout, on remercie "ALLAH" le tout puissant, qui nous a donné de la santé, de moyens et de volonté ardente dans la quête du savoir

Aussi, c'est avec un profond bonheur qu'on saisit l'occasion pour adresser nos plus sincères remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

On adresse les plus sincères remerciements à tous les professeurs de la spécialité Automatique, pour leurs aides et leurs encouragements

Enfin, nos remerciements, mais pas les moindres, vont à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Nous voulons remercier notre superviseur Dr. TIDJANI Naoual, pour ses travaux et conseils et son encadrement pendant la période de la recherche. Nous sommes très reconnaissants pour son soutien, ses encouragements et son aide précieuse.

Merci.

## **DEDICACES**

Je dédie ce mémoire :

Vers ceux qui m'ont toujours cherché, ceux qui m'ont fait confiance, qui m'ont soutenu sans relâche dans tous mes projets et qui ont accepté mes options sans forcément toujours les comprendre, merci papa et maman !!

À mes frères et sœurs, pour leur complicité et leur présence.

À toute ma famille ainsi qu'à mes amis, Mohammed, Noureddine, Islam, Houssien, Zakaria, Abdessalam, mes collègues et camarades

Sans oublier Dr. TIDJANI Naoual qui nous a beaucoup aidé, mon ami Abdellatif et merci.

**Djallel**

## **DEDICACES**

Je dédie ce mémoire :

Vers ceux qui m'ont toujours cherché, ceux qui m'ont fait confiance, qui m'ont soutenu sans relâche dans tous mes projets et qui ont accepté mes options sans forcément toujours les comprendre, merci papa et maman !!

À mes frères et mes sœurs, pour leur complicité et leur présence.

À toute ma famille ainsi qu'à mes amis, Selma, Abdellatif, Khaled, Mohamed, Akrima, Billal, mes collègues et camarades

Sans oublier Dr. TIDJANI Naoual qui nous a beaucoup aidé, mon ami Djallel et merci.

**Abdellatif**

## ملخص :

يندرج العمل المتناول في هاته المذكرة ضمن الإطار العام الهادف الى تحسين الاداء الديناميكي والسكوني لنظام توليد الكهرباء عن طريق الألواح الشمسية. انطلاقا من المبدئ المقر بانه تحت شروط مناخية معينة يمكن للوح شمسي ان ينتج الاستطاعة العظمى عند قيم معينة للجهد والتيار الكهربائيين. تمكننا من وضع التصميم الأمثل لمسيطر غامض مكرس للتتبع التلقائي والفوري لنقطة الاستطاعة العظمى (MPP) هاته الخطوة كانت متبوعة ببرمجة المسيطر على دارة مصفوفة البوابات المنطقية القابلة للبرمجة الحلقية من نوع (FPGA). الكلمات المفتاحية: نقطة الاستطاعة العظمى (MPP)، مسيطر غامض، دارة رقمية قابلة للبرمجة الحلقية FPGA.

## Résumé :

Le travail décrit à travers ce manuscrit verse dans le contexte global d'améliorations des performances d'un système photovoltaïque (PV). En partant du principe stipulant que dans des conditions environnementales données : un générateur photovoltaïque ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières de courant et de tension, on est parvenu à mettre au point une conception optimisée, qui a été suivie d'une implémentation matérielle sur un circuit numérique programmable de type "FPGA", d'un contrôleur flou dédié à la poursuite automatique et instantanée de ce point de puissance maximale communément baptisé par : "MPPT"

**Mots clés :** Système Photo-Voltaïque (PV), Poursuite du point de puissance maximale (MPPT), contrôleur flou, optimisation, circuit logiques programmable de type FPGA.

## **Abstract:**

The work described throughout this manuscript deal with the overall context of the improvement performance of a standalone photovoltaic (PV) system. And assuming that in given environmental conditions: a photovoltaic generator can deliver a maximum power only for particular values of voltage and current, we have developed an optimized design, which was followed by a hardware implementation non a programmable digital circuit: "FPGA", of a fuzzy controller dedicated to the automatic and instantaneous tracking of this maximum power point commonly called "MPPT".

**Keywords:** Photovoltaic system, Maximum Power Point Tracking (MPPT), fuzzy controller, optimization, genetic algorithms, and programmable logic circuit type:FPGA.

## ABRÉVIATIONS

Symbole	Prescription
<b>CS</b>	Convertisseur Statique
<b>PV</b>	Panneau Photovoltaïque
<b>INC</b>	Incrémentation de conductance
<b>FCC</b>	Fraction du courant de court-circuit
<b>FCO</b>	Fraction de la tension du circuit ouvert
<b><i>I<sub>ph</sub></i></b>	Photo courant d'une cellule photovoltaïque
<b><i>I<sub>s</sub></i></b>	Courant de saturation
<b><i>q</i></b>	Charge d'un électron ( $1.602 \times 10^{-19}$ C)
<b><i>V</i></b>	Tension à la borne de la diode (V)
<b><i>K</i></b>	Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$ J/K)
<b><i>T</i></b>	Température de jonction
<b><i>N</i></b>	Facteur d'idéalité d'une cellule photovoltaïque
<b><i>R<sub>s</sub></i></b>	Résistance série de la diode photovoltaïque
<b><i>R<sub>sh</sub></i></b>	Résistance shunt de la diode photovoltaïque
<b>MPP/ PPM</b>	Point de puissance maximale
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>DC / DC</b>	Convertisseur courant continu-continu
<b>P&amp;O</b>	Algorithme Perturbation et observation
<b>GPV</b>	Temp générateur photovoltaïque
<b><i>P<sub>max</sub> / P<sub>pv</sub></i></b>	Puissance maximale
<b><math>\eta</math> MPPT</b>	Rendement MPPT
<b><i>P<sub>out</sub></i></b>	Puissance de sortie
<b><i>L</i></b>	Inductance
<b><i>C</i></b>	Condensateur
<b><i>R</i></b>	Résistance de charge
<b>CCM</b>	Mode de condition continue
<b>PWM(MLI)</b>	Pulse Width Modulation (Modulation de Largeur d'Impulsion)
<b><i>f</i></b>	Fréquence (Hz)
<b><i>V<sub>o</sub></i></b>	Tension en circuit
<b><i>I<sub>c</sub></i></b>	Courant en circuit
<b><i>V<sub>pv</sub></i></b>	Tension maximal
<b><i>I<sub>pv</sub></i></b>	Courant maximal
<b><i>I<sub>cc</sub></i></b>	Courant de court-circuit
<b><i>V<sub>co</sub> / V<sub>oc</sub></i></b>	Tension en circuit ouvert
<b><math>\Delta V</math></b>	Variation de la tension
<b><math>\Delta P</math></b>	Variation de la puissance
<b>IC</b>	Initial Condition
<b><i>I<sub>cell</sub></i></b>	Courant fourni par la cellule [A]
<b><i>V<sub>mp</sub></i></b>	Tension à Pmax
<b><i>I<sub>mp</sub></i></b>	Courant à Pmax
<b>IC</b>	Incrémentation de la conductance
<b>FLinc</b>	Contrôleur Flou incrémentale
<b>FLC</b>	Flou logique contrôler

<b>D</b>	Duty (rapport cyclique)
<b>STC</b>	Conditions de test standard
<b>T</b>	Température
<b>G</b>	Insolation (Irradiation)
<b>FPGA</b>	Field programmable gate array
<b>CLB</b>	Configurable Logic Blocs (blocs d'entrées/sorties)
<b>IOB</b>	Input output Blocs
<b>XSG</b>	Xilinx system generator
<b>RLF</b>	Régulateur logique floue
<b>VHDL</b>	Very High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
<b>SRAM</b>	Static Read Only Memory
<b>LCA</b>	Logic Celles Arrays
<b>LUT</b>	Look Up Table
<b>IOB</b>	Input/output Bloc
<b>PLD</b>	Programmable Logic Device
<b>RAM</b>	Random Access Memory
<b>DoD</b>	Departement of Defense
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>CMOS</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor
<b>TTL</b>	Transistor Transistor Logic

## LISTE DES FIGURES :

Figure 1.1 : Centrale photovoltaïque installée à Tozeur en Tunisie [1].....	16
Figure 1.2: Système photovoltaïque autonome [2] .....	17
Figure 1.3 : Système photovoltaïque connecté au réseau [3] .....	17
Figure 1.4 : Système photovoltaïque hybride [4] .....	18
Figure 1.5 : Rayonnement solaire transmis à la Terre de météo France [5].....	19
Figure 1.6 : Illustre les diverses composantes du rayonnement solaire au niveau du sol [6] ..	20
Figure 1.7: Passage d'une cellule photovoltaïque vers un champ de panneaux Tirée [3] .....	22
Figure 1.8: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	22
Figure 1.9: Courbe caractéristique I-V d'un module PV pour 4 différentes d'irradiation.....	25
Figure 1.10: Courbe caractéristique I-V d'un module PV pour 4 différentes de température.	25
Figure 1.11: Courbe caractéristique P-V d'un module PV pour 4 différentes d'irradiation .....	26
Figure 1.12: Courbe caractéristique P-V d'un module PV pour 4 différentes de Température.....	26
Figure 1.13: Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques (En séries).....	27
Figure 1.14: Caractéristique résultante d'un groupement Constitué de $Np$ cellules identiques(En parallèle) ... ..	27
Figure 2.1: Schéma bloc d'un algorithme de recherche du MPPT .....	30
Figure 2.2: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge .....	31
Figure 2.3: convertisseurs DC/DC .....	33
Figure 2.4: Circuit électrique de base du convertisseur de Buck .....	34
Figure 2.5: Formes d'onde du convertisseur Buck .....	34
Figure 2.6 : Circuit électrique de base du convertisseur Boost.....	36
Figure 2.7: Formes d'onde du convertisseur Boost.....	37
Figure 2.8: Circuit électrique idéalisé du convertisseur Buck- boost .....	38
Figure 2.9: Principe de la première technique MPPT numérique .....	39
Figure 2.10: Algorithme type de la commande Hill Climbing [8].....	42
Figure 2.11Schéma de principe de la commande Hill Climbing .....	43
Figure 2.12: Recherche du PPM par la méthode (P&O) [9].....	44
Figure 2.13: Algorithme type de la méthode P&O [9].....	45
Figure 2.14: Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation .....	46
Figure 2.15: Différents types de fonctions d'appartenance .....	48
Figure 2.16: Structure d'un système basé sur la logique floue .....	49
Figure 2.17: Composition MAX-MIN [10].....	50
Figure 2.18: Organigramme de P&O amélioré par logique floue avec un pas variable [11].....	51
Figure 2.19: Bloc du calculateur de pas variable FLC proposé .....	52
Figure 2.20: Fonctions d'appartenance des entrées(dlpv) .....	53
Figure 2.21: Fonctions d'appartenance des entrées(dPV).....	53
Figure 2.22: Fonctions d'appartenance de la sortie(dD) .....	53
Figure 2.23: Représenté la Simulation du Convertisseur boost.....	55
Figure 2.24: Réponse tension sortie V du système .....	56
Figure 2.25: Réponse courant de sortie I du système .....	56
Figure 2.26: Simulations le système de MPPT P&O sur MATLAB .....	57
Figure 2.27: Résulta du courent de PV .....	58
Figure 2.28: Résulta de la tension charge .....	58
Figure 2.29 : Résulta de la tension PV .....	59
Figure 2.30: Résulta de la tension VM1 .....	59
Figure 2.31: Système permettant la simulation du comportement du convertisseur MPPT....	60
Figure 2.32: Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM.....	60
Figure 2.33: Réponse courant de la charge IPV.....	61
Figure 2.34: Réponse tension de la charge VPV .....	61

Figure 2.35: Réponse courant sortie IPV du système .....	62
Figure 2.36: Réponse tension sortie VPV du système .....	62
Figure 2.37: Réponse Puissance de sortie PWM du système.....	63
Figure 2.38 : Réponse de la sortie PID OUTPUT .....	63
Figure 3.1 : Schéma fonctionnel d'implantation d'une description VHDL dans un circuit FPGA67	
Figure 3.2 : Montre comment se présente le logiciel (ISE Xilinx Project Navigator). .....	68
Figure 3.3: Représenté le Bloc (1).....	69
Figure 3.4: Schéma global des constitutions du bloc (1) .....	70
Figure 3.5 : Bloc de fuzzification de l'entrée dE .....	70
Figure 3.6: Simulation du bloc de fuzzification de l'entrée dE en prenant la valeur 0.958 .....	71
Figure 3.7: Bloc de fuzzification de l'entrée E .....	71
Figure 3.8: Simulation du bloc de fuzzification de l'entrée E en prenant les deux valeurs (- 2.673 et - 5.220) .....	72
Figure 3.9: Bloc d'inférences .....	72
Figure 3.10: Simulation du bloc.....	73
Figure 3.11: Bloc qui calcule le Num et le Denum.....	74
Figure 3.12: Réponse de simulation Format décimal .....	75
Figure 3.13: Réponse de simulation Format binaire.....	75
Figure 3.14: Bloc qui calcule la valeur de dD multipliée par $10^5$ .....	76
Figure 3.15: Simulation du bloc de division .....	76
Figure 3.16 : Boite de visualisation des règles sous MATLB .....	77
Figure 3.17 : Simulation de fonctionnement global du bloc (1).....	78
Figure 3.18: Bloc (2) .....	78
Figure 3.19: Format de signal généré par le bloc (2).....	79
Figure 3.20: Simulation de bloc (2).....	79
Figure 3.21: Représenté 1ère tranche de bloc (3).....	80
Figure 3.22: Représenté 2em tranche de bloc (3).....	80
Figure 3.23: Simulation de la première partie du bloc (3) .....	81
Figure 3.24: Simulation de la deuxième partie du bloc (3) .....	81
Figure 3.25: Contrôleur global.....	82
Figure 3.26: Schéma des constitutions du contrôleur global.....	82
Figure 3.27 : Simulation de la poursuite de la MPP par le réseau logique flou .....	83

## **LISTE DES TABLEAUX :**

Tableaux 2.1 : Complexité de chaque type de convertisseur DC/DC .....	33
Tableaux 2.2 : Règles utilisées pour déterminer la sortie $\Delta d$ .....	54
Tableaux 3.3 : Résultats donnés par ce bloc avec celles de calcul exact.....	71
Tableaux 3.4 : Valeurs données par la simulation .....	72
Tableaux 3.5 : Présente quelques comparaisons .....	77

## **TABLE DES MATIERES :**

### **INTRODUCTION GENERALE :**

#### **CHAPITRE 01 : GENERALITES SUR LE SYSTEME DE PHOTOVOLTAÏQUE.....15**

1Introduction .....	15
1.1 Centrale photovoltaïque.....	15
1.2 Type des systèmes photovoltaïques .....	16
1.3 Système photovoltaïque autonome.....	16
1.4 Système photovoltaïque connecté au réseau .....	17
1.5 Système photovoltaïque hybride .....	18
2Rayonnement solaire.....	18
2.1 Types des rayonnements solaires [3].....	19
2.2 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques .....	20
2.2.1 Avantages des systèmes photovoltaïques.....	20
2.2.2 Inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	21
3Module photovoltaïque .....	21
3.1 Cellule photovoltaïque .....	22
3.2 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire.....	23
3.3 Configurations Courbe caractéristique d'un module photovoltaïque .....	24
3.3.1 Courbe courant-tension I-V .....	24
3.3.2 Courbe puissance-tension P-V .....	25
3.4 Association de Cellules Photovoltaïques .....	26
3.4.1 En Série .....	26
3.4.2 En Parallèle .....	27
4CONCLUSION .....	28

#### **CHAPITRE 2 : MODELISATION DU CONVERTISSEUR DC-DC ET LA COMMANDE MPPT.....29**

1Introduction .....	29
2.Principes de Conversion dans les Systèmes PV.....	31
2.1Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge.....	31
3Convertisseur DC/DC .....	33
3.1 Types des convertisseurs .....	34
3.1.1 Convertisseurs Buck .....	34
3.1.2 Convertisseurs Boost.....	36
3.1.3 Convertisseur Buck boost .....	38
4. Méthode d'extraction du point de puissance maximum (MPPT) .....	38
4.1 Principe de la commande MPPT .....	39

4.2 Classification Des Commandes MPPT .....	40
4.3 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entré .....	40
4.3.1 Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres d'entrée du CS.....	40
4.3.2 Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres de sortie du convertisseur	40
4.4 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche .....	41
4.4.1 MPPT Indirect.....	41
4.4.2 MPPT Direct .....	41
4.5 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée .....	42
4.5.1 Principe des commandes "Hill Climbing" .....	42
4.5.2 Principe de la commande "Perturb and Observ" (P&O) .....	43
5 Logique floue.....	47
5.1 Principe de la logique floue.....	47
5.1.1 Variables linguistiques et ensembles flous.....	47
5.1.2 Fonctions d'appartenance .....	48
5.1.3 Règles linguistiques .....	48
5.2 Structure générale d'un système flou .....	48
5.2.1 Fuzzificateur .....	49
5.2.2 Inférence floue .....	49
5.2.3 Défuzzification .....	50
6 Avantages et inconvénients du réglage par logique floue.....	50
6.1 Avantages.....	50
6.2 Inconvénients.....	50
7 Algorithme P&O basée sur la logique floue .....	51
7.1 Problèmes liés à l'algorithme P&O à pas fixe.....	51
7.2 Algorithme P&O basé sur la logique floue .....	51
7.3 Contrôleur flou (FLC) utilisé avec un pas variable .....	52
8 Simulation de l'Algorithme dans MATLAB .....	54
8.1 Simulation du Convertisseur boost avec PV.....	54
8.2 Réponse MPPT fonctionnante à partir des paramètres de sortie du convertisseur boost .....	56
8.3 Simulation de l'Algorithme Perturbation et Observation (P&O) .....	57
8.4 Réponses Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entré .....	61
9 CONCLUSION .....	64

<b>CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION FPGA.....</b>	<b>65</b>
1Introduction .....	65
2Langage de description VHDL .....	66
2.1 Relation entre une description VHDL et un circuit FPGA .....	67
2.2 Saisie du texte VHDL.....	68
2.1.1 Explications et Simulations des constituants du contrôleur logique flou.....	68
1. Bloc (1) .....	69
A. Bloc de fuzzification de l'entrée dE .....	70
B. Bloc de fuzzification de l'entrée E.....	71
C. Bloc des inférences .....	72
D. Normalisation et la défuzzification.....	73
E. Simulation globale du Bloc (1) .....	77
2. Le Bloc (2).....	78
3. Le Bloc (3) .....	80
4. Assemblage des trois blocs (1), (2), (3) .....	82
5. Simulation de la poursuite du MPP par le contrôleur logique flou .....	83
3.CONCLUSION .....	84
4.CONCLUSION GENERALE.....	85
REFERENCES.....	86

## **INTRODUCTION GENERALE :**

Aujourd'hui, l'homme dispose de nombreuses sources d'énergie sur la planète. Les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) les plus utilisées sont non renouvelables et le résultat d'un long processus de transformation de la matière organique, faciles à utiliser et rentables. Cependant, il semble que ces énergies ne soient plus utilisables pour diverses raisons. D'abord et avant tout, les réserves d'énergie fossile commencent à s'épuiser. Ensuite, en raison de la forte demande de pays en développement comme la Chine et l'Inde, pour n'en nommer que quelques-uns, les prix de ces énergies continuent d'augmenter, les rendant inabordables pour certaines personnes. Puis, lors de leur utilisation, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, par exemple), ce qui contribue significativement au réchauffement climatique, qui devient un problème croissant pour la terre et tous les êtres vivants.

Les énergies renouvelables sont actuellement populaires et largement soutenues en raison de leur abondance et de l'absence de pollution. La source d'énergie renouvelable la plus développée, populaire et en expansion rapide est l'énergie solaire. C'est une énergie très abondante, imparable et durable puisqu'elle peut être utilisée dans diverses industries, y compris l'agriculture, le logement et les centrales électriques. Une caractéristique importante des modules photovoltaïques est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement donné, localisé par une tension et un courant connu, appelé en anglais Maximum Power Point (MPP). L'autre problème est que la position de ce point n'est pas fixe mais se déplace en fonction de l'ensoleillement et de la température.

« Maximum power point tracking » (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons au problème de poursuite du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque suivant concepts l'approche logique floue.

Pour cela les différentes étapes de conception et de réalisation d'un contrôleur MPPT logique flou vont être décrites dans ce travail.

L'interface SIMULINK de Matlab a été d'abord utilisé pour la conception d'un contrôleur MPPT P&O afin de construire une base de données. Cette dernière a été ensuite utilisée pour la conception d'un contrôleur MPPT logique flou conjointement avec l'outil ANFIS de Matlab. Après des simulations concluantes on est passé à l'étape de réalisation hardware :

De contrôleur MPPT logique flou sur un circuit FPGA nous allons utiliser le langage de simulation les securit intégré VHDL.

---

*CHAPITRE 01 : GENERALITES SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE*

---

**1 Introduction :**

Le système photovoltaïque (PV) est l'une des technologies les plus importantes pour produire de l'énergie électrique. Cependant, il y a deux défauts majeurs, l'un est le faible rendement de conversion du système PV dû aux changements des conditions météorologiques, et l'autre est dû à la nature non linéaire des caractéristiques du réseau PV.

Les caractéristiques puissance-tension (P-V) et courant tension (I-V) changent généralement de manière non linéaire avec les changements de température et d'irradiation. Le suivi conventionnel du point de puissance maximale comprend des régulateurs de charge utilisés pour extraire la puissance maximale disponible du module PV en fonction de la variation de paramètres tels que la température et l'irradiation solaire. Le module PV produira une puissance maximale à une certaine tension, appelée point de puissance maximale. Les méthodes P&O et INC sont les plus utilisées dans les modules MPPT. D'autres techniques sont aussi utilisées, et qui sont dites fractionnelles, basées sur la mesure de la fraction de la tension du circuit ouvert (FCO), et la mesure de la fraction du courant de court-circuit (FCC).

Dans ce chapitre, une revue de la littérature est présentée sur les différents systèmes photovoltaïques et leurs topologies de connexion, leurs avantages et inconvénients. Puis une présentation des différentes configurations du convertisseur DC-DC et enfin les différentes techniques d'extraction du point de puissance maximale.

**1.1 Centrale photovoltaïque :**

Les centrales photovoltaïques utilisent les rayons du soleil, qui est abondante, disponible, intermittente et facile à capturer. Cette énergie est ensuite transformée en énergie électrique à l'aide des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un type de centrales solaires. En effet, un grand nombre de panneaux sont installés dans une configuration optimale et récoltent l'énergie lumineuse du soleil pour la convertir en énergie électrique qui alimente le réseau.

La figure 1.1 montre une central photovoltaïque installé à Tozeur en Tunisie d'une capacité de 10 MW et qui sera raccordé au réseau.



*Figure 1.1 : Centrale photovoltaïque installée à Tozeur en Tunisie [1]*

### **1.2 Type des systèmes photovoltaïques :**

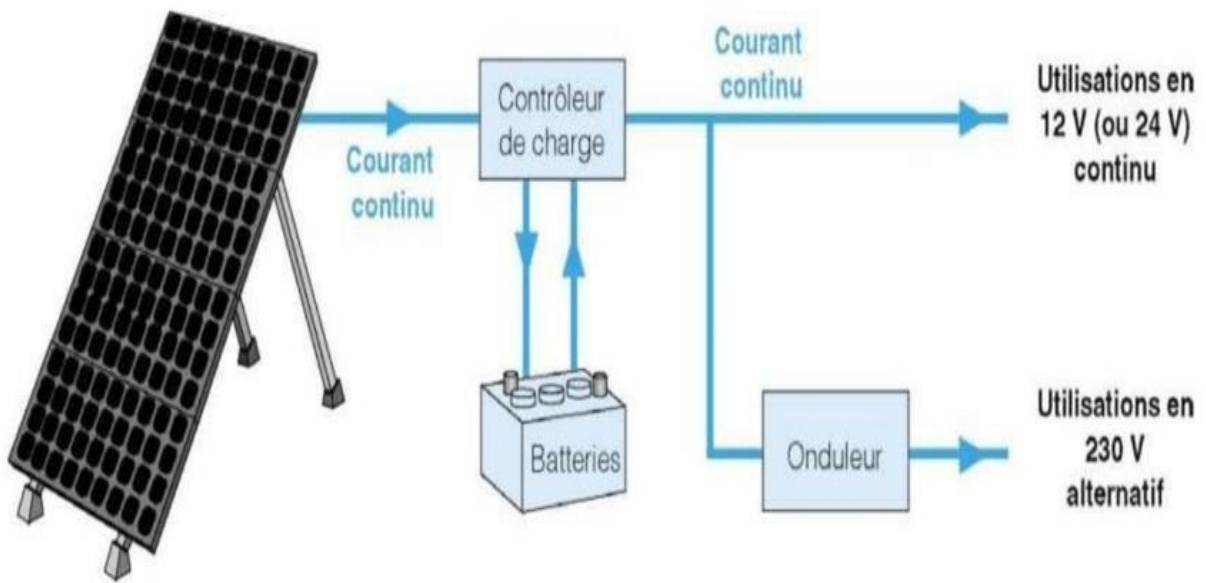
Il existe trois catégories de systèmes photovoltaïques :

- Connectés au réseau (on grid)
- Isolés (off grid)
- Hybrides

Le système sur le réseau est donc constitué d'un ensemble de composants qui transforment l'énergie solaire en électricité et sont directement intégrés au réseau, alors que le système hors réseau dépend de la création d'énergie indépendante par l'utilisation de batteries qui ne sont pas connectées au réseau. Les systèmes hybrides combinent les fonctionnalités des deux systèmes.

### **1.3 Système photovoltaïque autonome :**

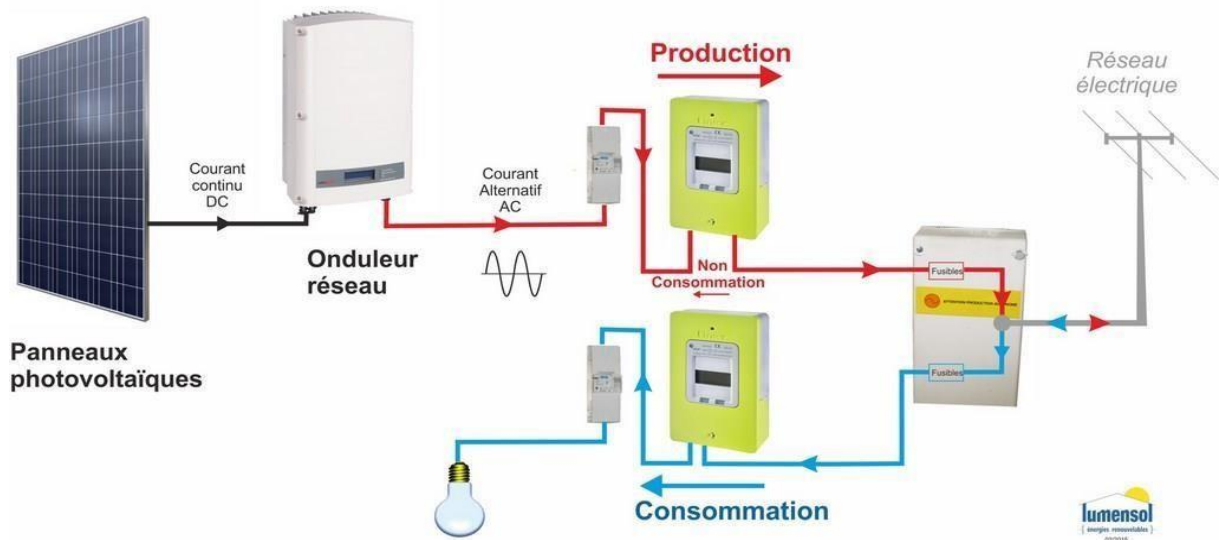
Le terme « systèmes PV hors réseau » ou « systèmes autonomes » désigne les systèmes PV qui ne sont pas connectés au réseau électrique. Alors que les systèmes de stockage de batteries peuvent stocker de l'énergie à utiliser plus tard, la nuit ou par temps orageux, les systèmes directs utilisent l'énergie photovoltaïque dès qu'elle est produite. Ces systèmes sont utilisés indépendamment des réseaux électriques et peuvent être utilisés pour alimenter les stations de radio, les cabines téléphoniques et l'éclairage public. La figure 1.2 montre un système photovoltaïque autonome typique [2].



*Figure 1.2 : Système photovoltaïque autonome [2]*

**1.4 Système photovoltaïque connecté au réseau [3] :**

Ces systèmes sont reliés à un plus grand réseau électrique. Le système PV est connecté au réseau électrique via un onduleur de haute qualité, qui transforme le courant de champ PV continu en courant alternatif conforme aux normes du réseau. La production d'électricité du réseau pendant la journée est soit utilisée immédiatement, soit renvoyée aux entreprises de distribution d'électricité comme le montre la figure 1.3.



*Figure 1.3 : Système photovoltaïque connecté au réseau [3]*

## Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

### 1.5 Système photovoltaïque hybride [4]:

Un système hybride combine la production d'énergie solaire avec d'autres sources d'énergie, généralement un générateur diesel. Il est également possible d'utiliser le biogaz. La source d'énergie de remplacement consiste généralement en un générateur capable d'ajuster la puissance de sortie en fonction de la demande. Cependant, plus d'une source d'énergie renouvelable peut être utilisée, comme l'énergie solaire et l'éthane. Un système hybride éolien-PV typique est composé d'une petite éolienne, d'un générateur photovoltaïque, d'un système de stockage approprié et d'équipements électroniques. La production d'énergie photovoltaïque permet de réduire la consommation de combustibles non renouvelables. La figure 1.4 montre un système hybride typique.



Figure 1.4 : Système photovoltaïque hybride [4]

## 2 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75  $\mu\text{m}$ ) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4  $\mu\text{m}$  environ). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre plus atmosphère Figure 1.5, environ 100  $\text{W.m}^2$  sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [5].

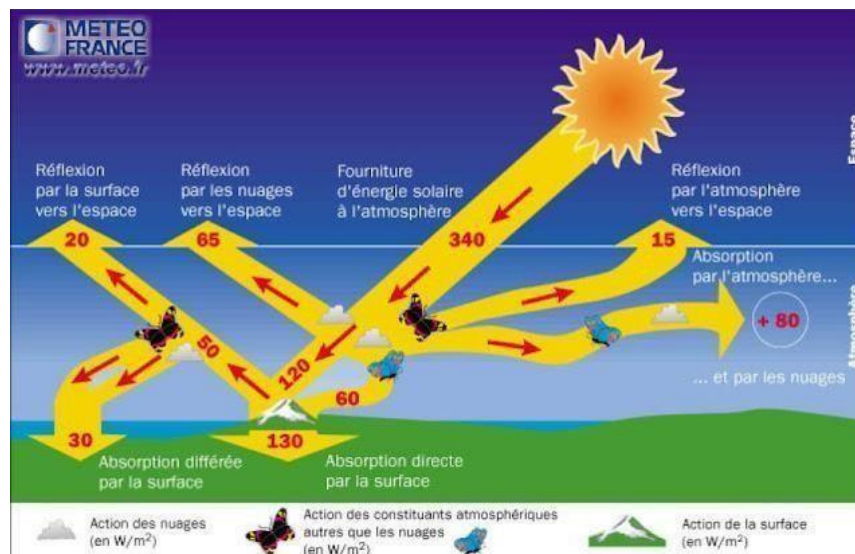


Figure 1.5 : Rayonnement solaire transmis à la Terre de météo France [5]

La figure 1.5 publiée par Météo France, montre que près du quart de cet éclaircissement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages ( $65 \text{ W.m}^2$ ), le reste ( $15 \text{ W.m}^2$ ) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc  $180 \text{ W.m}^2$  qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers ( $120 \text{ W.m}^2$ ) se font directement, le reste ( $60 \text{ W.m}^2$ ) s'effectuant par diffusion vers le bas.

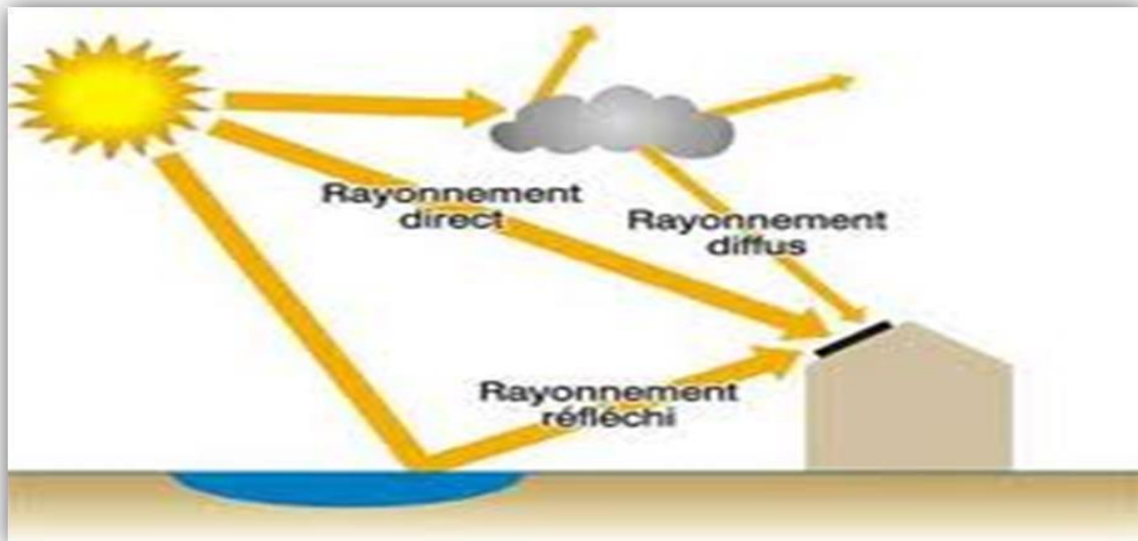
Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les  $180 \text{ W.m}^2$  incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ  $50 \text{ W.m}^2$ . En fait, la majeure partie de l'éclaircissement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux  $180 - 50 = 130 \text{ W.m}^2$  de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Terre après diffusion différée vers le bas. Cette énergie s'ajoute aux  $130 \text{ W.m}^2$  initialement non réfléchis pour constituer approximativement les  $160 \text{ W.m}^2$  qu'absorbe la surface terrestre [5].

### 2.1 Types des rayonnements solaires [6] :

- **Le rayonnement direct** : Le rayonnement solaire direct qui est reçu sans être diffusé par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles les uns aux autres.
- **Le rayonnement diffus** : C'est le rayonnement solaire qui est dispersé par les différents gaz qui composent l'atmosphère.
- **Le rayonnement réfléchi (Albédo)** : Il est décrit comme la partie réfléchie solaire.

## Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

- **Le rayonnement global** : L'énergie reçue par une surface est donc définie au niveau du sol comme la somme des rayonnements directs et diffus.



*Figure 1.6 : Illustre les diverses composantes du rayonnement solaire au niveau du sol [6]*

### 2.2 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques :

Le passage à l'énergie photovoltaïque a été une solution durable et moins coûteuse pour des dizaines de millions. Si les cellules photovoltaïques présentent de nombreux avantages pour la communauté, elles ont aussi quelques inconvénients.

#### 2.2.1 Avantages des systèmes photovoltaïques :

Les systèmes photovoltaïques présentent plusieurs avantages et parmi eux on cite :

- L'électricité produite par les cellules photovoltaïques est non polluante et silencieuse. Parce qu'ils n'utilisent pas d'autres ressources que le soleil, les systèmes photovoltaïques n'émettent pas de pollution nocive pour l'eau ou l'air dans l'environnement et n'épuisent pas les ressources naturelles.
- L'énergie solaire est une ressource renouvelable disponible localement. Il n'est pas nécessaire de l'importer d'autres régions ou pays.
- Un système PV peut être construit à n'importe quelle taille en fonction des besoins énergétiques. En outre, le propriétaire d'un système PV peut l'agrandir ou le déplacer si ses besoins énergétiques évoluent. Par exemple, les propriétaires peuvent ajouter des modules tous les deux ou trois ans, à mesure que leur consommation d'énergie et leurs ressources financières augmentent.

## **Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque**

### **2.2.2 Inconvénients des systèmes photovoltaïques :**

Malgré les avantages multiples des systèmes PV dans la production, l'installation et les impacts environnementaux, ces systèmes présentent quelques inconvénients :

- Certains produits chimiques toxiques, comme le cadmium et l'arsenic, sont utilisés dans le processus de production des cellules PV. Ces incidences sur l'environnement sont mineures et peuvent être facilement maîtrisées grâce au recyclage et à une élimination appropriée.
- L'énergie photovoltaïque est un peu plus chère à produire par rapport aux sources d'énergie conventionnelles comme le pétrole ou le gaz, en partie à cause du coût de mise en œuvre des dispositifs photovoltaïques et en partie à cause des rendements de conversion des équipements.
- L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie instable.

### **3 Module photovoltaïque :**

Les cellules PV sont les éléments de base des modules PV. Pour presque toutes les applications, la tension produite par une seule cellule est insuffisante. Par conséquent, les cellules sont connectées ensemble en série pour augmenter la tension. Plusieurs de ces chaînes de cellules en série peuvent être connectées en parallèle pour augmenter le courant [3]. La figure 1.7 montre le passage d'une cellule photovoltaïques jusqu'à un champ de panneaux.

## Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

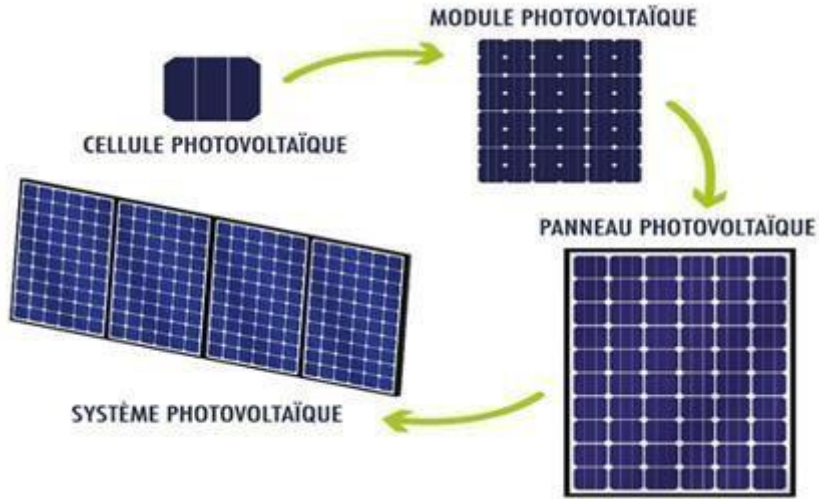


Figure 1.7 : Passage d'une cellule photovoltaïque vers un champ de panneaux Tirée [3]

### 3.1 Cellule photovoltaïque [2] :

La cellule photovoltaïque est l'unité de base d'un module photovoltaïque et c'est l'élément chargé de transformer les rayons du soleil ou les photons directement en énergie électrique.

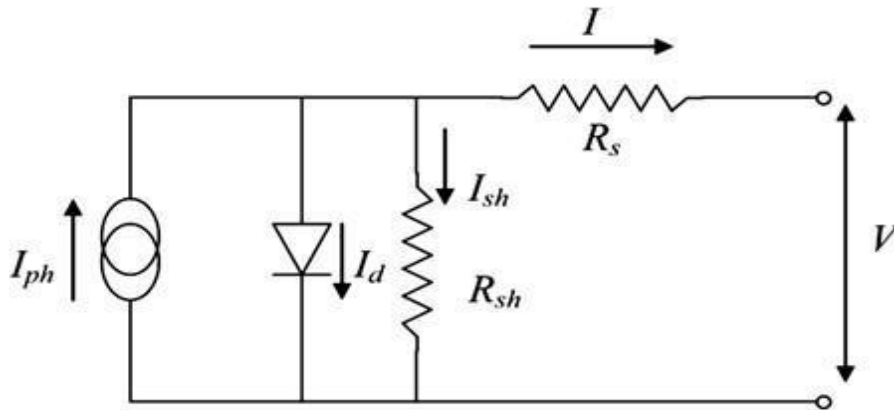


Figure1.8 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [8]

La cellule PV est caractérisée par trois types de courant de base, la photo courant  $I_{ph}$  produit par la cellule, le courant de jonction  $I_d$  et enfin le courant de la résistance  $R_{sh}$ . Ces trois courants sont calculés partir des équations suivantes :

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{N \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_1(T_c - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (1.2)$$

$$I_s = \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

## Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

Et enfin le courant de sortie de la cellule est calculé à partir des équations (1.4) et (1.5)

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.4)$$

$$I = [I_{sc} + K_t(T_c - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} - I_s \left[ e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{N \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

Avec :

- **I<sub>ph</sub>**: Photo-courant créé par la cellule.
- **I<sub>s</sub>**: Courant de saturation
- **q**: Charge d'un électron (1.602×10<sup>-19</sup> C)
- **V**: Tension à la borne de la diode (V)
- **K**: Constante de Boltzmann (1.381×10<sup>-23</sup> J/K)
- **T**: Température de jonction
- **N**: Facteur d'idéalité d'une cellule photovoltaïque
- **R<sub>s</sub>**: Résistance série de la diode photovoltaïque
- R<sub>sh</sub>**: résistance shunt de la diode photovoltaïque

### 3.2 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire [2] :

La caractéristique I-V d'une cellule solaire se compose de Cinq points essentiels :

#### 1) Tension en circuit ouvert :

La tension en circuit ouvert  $V_{co}$  apparaît à un point de la caractéristique  $I - V$  où le courant est nul. A ce stade, la puissance fournie par la cellule solaire est nulle. Dans le cas idéal, la tension  $V_{co}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.6)$$

Avec :

- **I<sub>ph</sub>**: photo-courant créé par la cellule.
- **T**: Température de la jonction.
- **I<sub>s</sub>**: Courant de saturation inverse.
- **q**: Charge de l'électron.
- **K**: Constante de Boltzmann.

#### 2) Courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit  $I_c$  apparaît en un point de la caractéristique  $I - V$  où la tension est nulle. Il est donné par la relation suivante :

$$I_{cc} = q \int_0^{\infty} f(\lambda) [1 - R(\lambda)] R_s \cdot d\lambda \quad (1.7)$$

$f(\lambda)$ : Flux de photons reçu par la cellule.

## Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

$R(\lambda)$  : Coefficient de réflexion de la surface de la cellule.

### 3) Puissance maximale :

$I_m$  et  $V_m$  correspondent au courant et à la tension auxquels la cellule solaire produit sa puissance maximale  $P_{max}$ .

$$P_{max} = I_m \cdot V_m \quad (1.8)$$

### 4) Facteur de forme :

Le facteur de remplissage FF (fill factor) dépend des grandeurs  $P_{max}$ ,  $I_c$  et  $V_{co}$ . Les bonnes cellules solaires ont un FF supérieur à 0.7 La résistance  $R_s$  diminue le facteur de forme. Ce facteur est défini comme suit :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.9)$$

### 5) Rendement

Une cellule solaire est identifiée par sa sortie, qui est définie comme suit :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i} FF \quad (1.10)$$

## 3.3 Configurations courbe caractéristique d'un module photovoltaïque :

Un générateur ou un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques individuelles qui sont connectées en série ou en parallèle pour obtenir les caractéristiques souhaitées comme la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert. En effet, dans des conditions d'ensoleillement classiques (1000W/m<sup>2</sup> ; 25°C ; AM=1,5), la puissance maximale délivrée par une cellule en silicium de 150 cm<sup>2</sup> est d'environ 2,3 W à une tension de 0,5 V. Une cellule élémentaire photovoltaïque représente donc un générateur électrique de faible puissance insuffisant pour la majorité des usages domestiques ou industriels et les paramètres qui déterminent le fonctionnement d'un module photovoltaïque se reflètent dans leurs courbes caractéristiques, courant tension  $I - V$ , puissance tension  $P - V$  [8].

### 3.3.1 Courbe courant-tension I-V :

Le courant de sortie dépend de l'irradiation actuelle. Plus l'irradiation est élevée, plus le courant est important. Cependant, la tension va se maintenir presque constante et elle ne va pas varier beaucoup, bien qu'elle augmente ou diminue l'irradiation. La figure 1.9 montre la courbe  $I - V$  d'un module PV pour 4 différentes valeurs d'irradiation et pour une température constante.

## Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

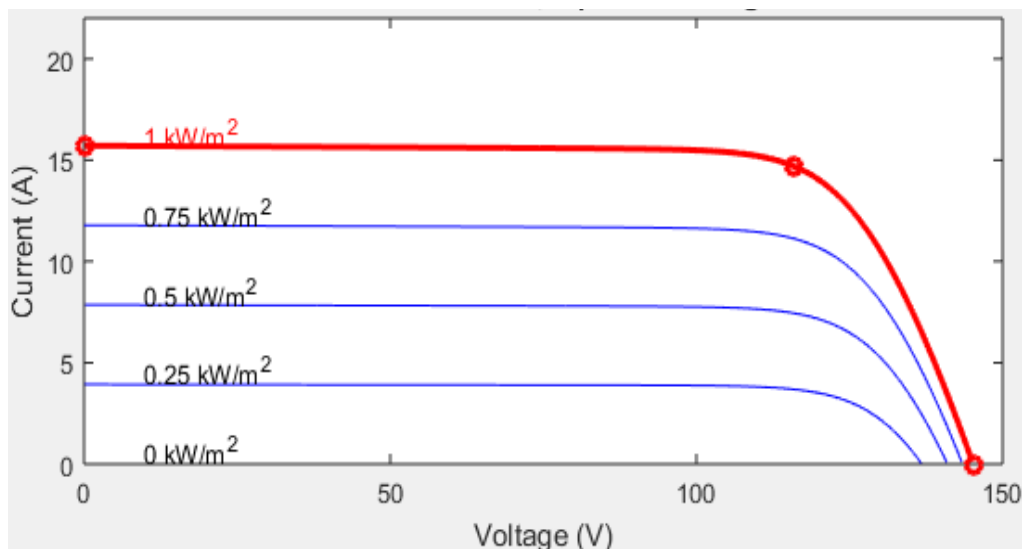


Figure 1.9 : Courbe caractéristique I-V d'un module PV pour 4 différentes d'irradiation

De plus, l'efficacité d'un module photovoltaïque diminue avec la hausse des températures, principalement en raison d'une baisse de tension en circuit ouvert. Enfin, malgré une légère hausse de température, la surface restera moins sensible. La figure (1.10) montre la courbe I-V d'un module PV pour 4 différentes valeurs de température et pour une irradiation constante.

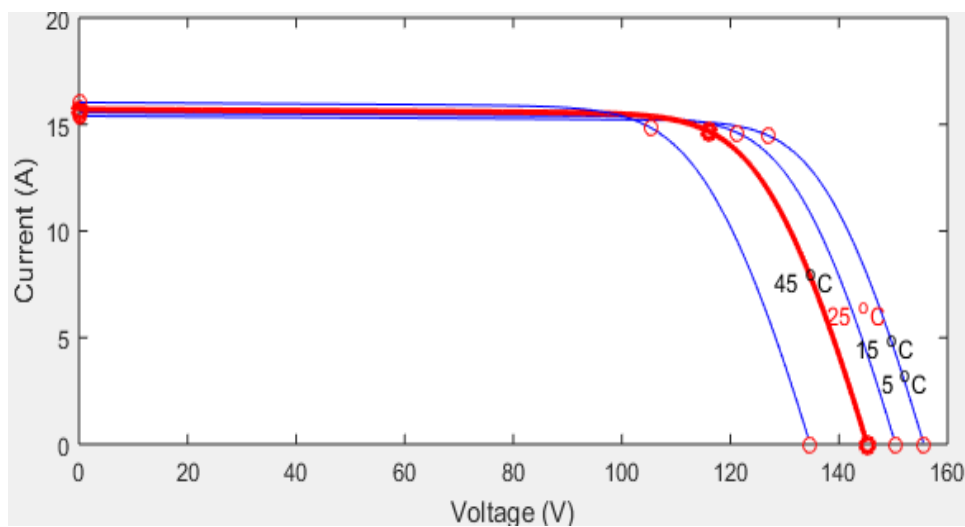


Figure 1.10 : Courbe caractéristique I-V d'un module PV pour 4 différentes de température

### 3.3.2 Courbe puissance-tension P-V :

L'influence de la variation de l'irradiation, à température constante, est fondamentale pour le calcul du point de puissance maximale (MPP). Plus l'irradiation est élevée, plus le MPP du module photovoltaïque est important. La figure 1.11 montre la courbe P-V d'un module PV pour 4 différentes valeurs d'irradiation et pour une température constante.

## Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

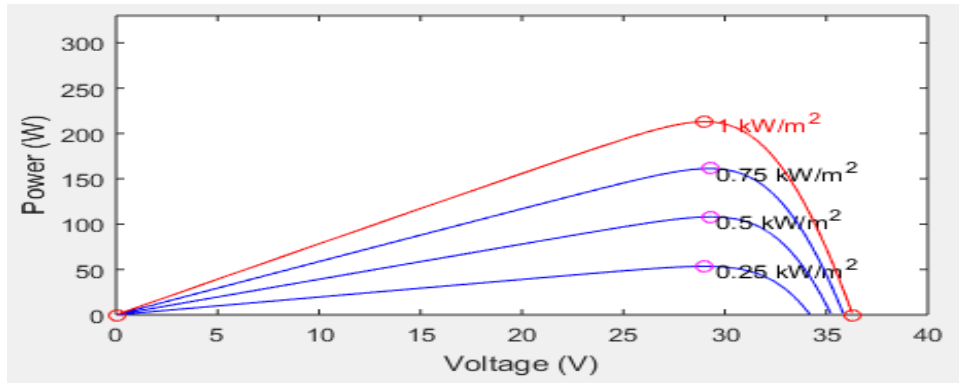


Figure 1.11 : Courbe caractéristique P-V d'un module PV pour 4 différentes d'irradiation

Dans le cas où l'irradiation est constante, on peut voir l'influence de la température sur la tension. Plus la température est élevée, plus la tension est faible. La puissance reste presque linéaire jusqu'à une valeur. À partir de cette valeur, la puissance diminue également avec l'augmentation de la température.

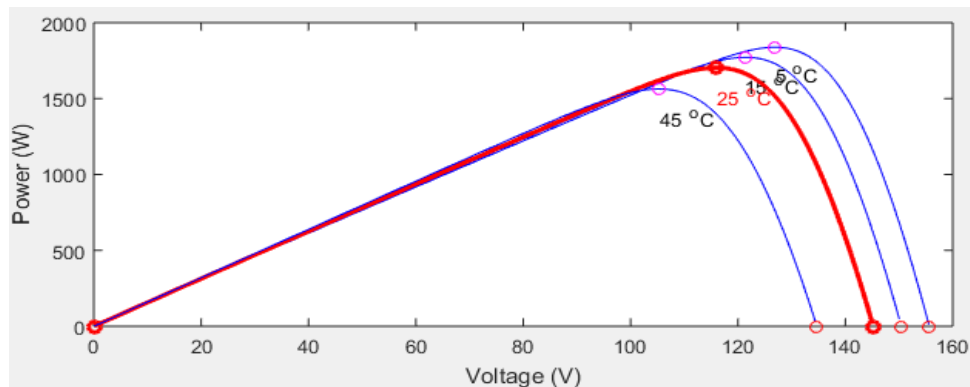


Figure 1.12 : Courbe caractéristique P-V d'un module PV pour 4 différentes de Température

La figure 1.12 montre la courbe P-V d'un module PV pour 4 différentes valeurs de température et pour une irradiation constante.

Les courbes  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  pour diverses différentes températures de fonctionnement et valeurs d'irradiation du panneau photovoltaïque de type 1SOLTECH 1STH-215-P.

### 3.4 Association de Cellules Photovoltaïques [2] :

#### 3.4.1 En Série :

La connexion en série de n-cellules augmente la tension du générateur photoélectrique (GPV). Les cellules sont alors croisées par le même courant, et la propriété sérielle est obtenue en ajoutant la tension de chaque cellule, comme le montre la figure 1.13

L'équation (1.11) résume les propriétés électriques d'une série :

$$I_{sc} = I_{cc} \text{ et } V_{sco} = nV_{co} \quad (1.11)$$

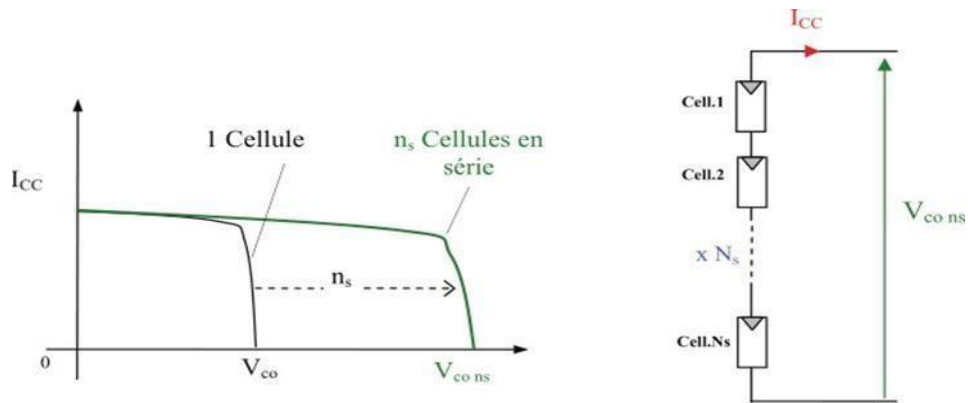


Figure 1.13 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques (En séries). [2]

**3.4.2 En Parallèle :**

Une association parallèle de cellules  $N_p$  est possible, ce qui permet d'augmenter le courant généré. Dans un regroupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique du regroupement est obtenue en ajoutant des courants, comme le montre la figure 1.14

$$I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co} \tag{1.12}$$

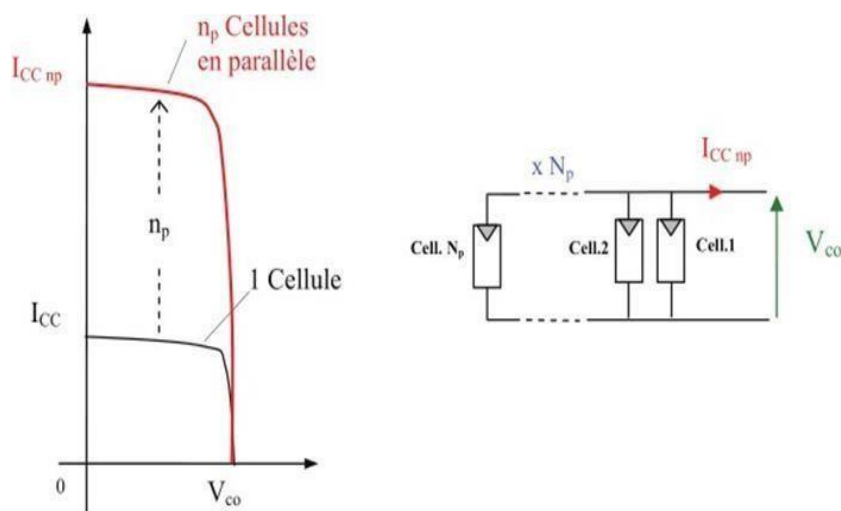


Figure 1.14 : Caractéristique résultante d'un groupement Constitué de  $N_p$  cellules identiques (En parallèle) [2]

## **4 CONCLUSION :**

Dans ce chapitre, nous avons discuté des principes généraux des systèmes photovoltaïques, ainsi que des cellules photovoltaïques qui fonctionnent sur le principe de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Nous avons également discuté des différents types de cellules et de leurs performances, des modules photovoltaïques et de leurs paramètres, ainsi que de l'effet de l'irradiance et de la température sur les caractéristiques tension-courant et tension-tension.

---

*CHAPITRE 2 : MODELISATION DU CONVERTISSEUR DC-DC ET LA  
COMMANDE MPPT*

---

## **1 Introduction :**

L'énergie solaire est considérée comme la source d'énergie de remplacement la plus avantageuse, car elle offre intimité, sécurité et énergie libre, contrairement aux autres sources d'énergie. Cependant, l'efficacité de la conversion énergétique liée à la charge présente des défis qui limitent le rendement de cette source. Même si les panneaux solaires sont de plus en plus efficaces, leurs rendements sont encore relativement faibles (environ 20 %). C'est pourquoi il est essentiel d'utiliser autant de puissance que possible tout en minimisant les pertes d'énergie autant que possible.

En effet, plusieurs études ont montré que l'énergie des photons convertis en électricité est une fonction très variable de clarté et de température, ainsi que la charge connectée au générateur PV.

Pour contrer ces effets, des lois spécifiques ont été élaborées et mises en œuvre à partir de 1968 pour permettre à ces appareils de produire leur puissance électrique optimale, indépendamment de la charge ou du rayonnement solaire. Dans la littérature, ce type de commande est connu comme Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Cette étude est menée via l'association d'un niveau d'adaptation entre le panneau solaire et la charge, en plus de la commande MPPT. La figure 2.1 illustre le fonctionnement de base d'un tel système. [2]

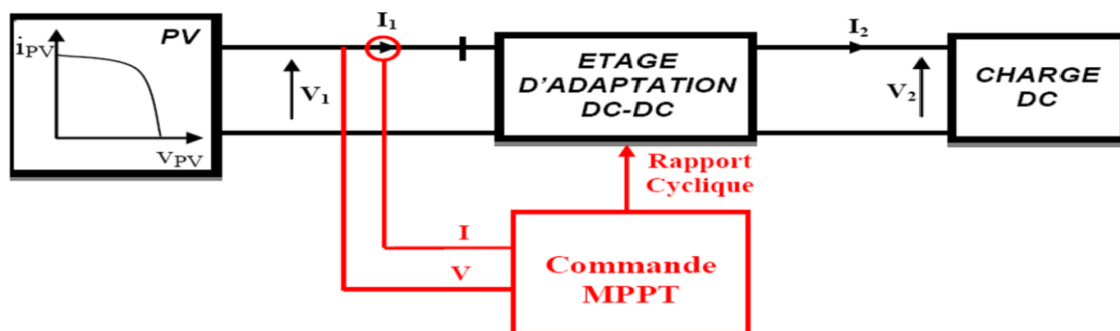


Figure 2.1 : Schéma bloc d'un algorithme de recherche du MPPT [2]

Comme nous l'avons vu dans chapitre 1, l'énergie obtenue à partir de panneaux solaires est relativement faible et insuffisante. Cela est dû aux conditions météorologiques changeantes telles que l'ensoleillement et la température, ce qui entraîne un faible pourcentage de puissance, précédents montrent les variations de puissance  $P$  et de courant  $I$  en fonction de la température et du rayonnement solaire.

En effet, dans des conditions changeantes, la puissance extractible est variable et dépend de la tension (ou du courant) appliquée aux bornes du panneau photovoltaïque. En conséquence, le système d'exploitation doit s'ajuster afin d'extraire le plus de puissance possible : par conséquent, le concept de MPPT (Maximum Power Point Tracking) est apparu.

Dans ce chapitre nous allons voir le principe de fonctionnement de la chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque, comme nous allons aussi présenter les divers convertisseurs DC/DC, puis nous allons décrire en détail les algorithmes les plus utilisés « Perturbe et Observe » [2], et l'algorithme basé sur la logique floue en utilisant Matlab/Simulink dans ce chapitre.

## 2 Principes de Conversion dans les Systèmes PV :

Le générateur PV est le composant principal d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, des éléments supplémentaires sont nécessaires, tels que le stockage de l'énergie, la régulation du flux d'énergie ou l'alimentation de réseau alternative. Ces composants supplémentaires représentent une part importante du coût, réduisent la production et ont un impact significatif sur le comportement et les performances du système global.

### 2.1 Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge :

Un GPV a des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires, ainsi que des points de puissance maximum (PPM). Ces caractéristiques sont affectées par le niveau de clarté et la température de la cellule. En outre, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV est débité, on peut trouver une différence significative entre la puissance potentielle du générateur et la puissance effectivement transférée à la charge en mode de connexion directe. Pour extraire la puissance maximale disponible des bornes du GPV à un moment donné et la transférer à la charge, la méthode standard consiste à utiliser une couche d'adaptation entre le GPV et la charge, comme le montre la figure 2.2. Ce niveau sert d'interface entre les deux éléments, assurant le contrôle par une action de contrôle, le transfert de la puissance maximale fournie par le générateur de manière à ce qu'elle soit aussi proche que possible de  $P_{MAX}$  [2]

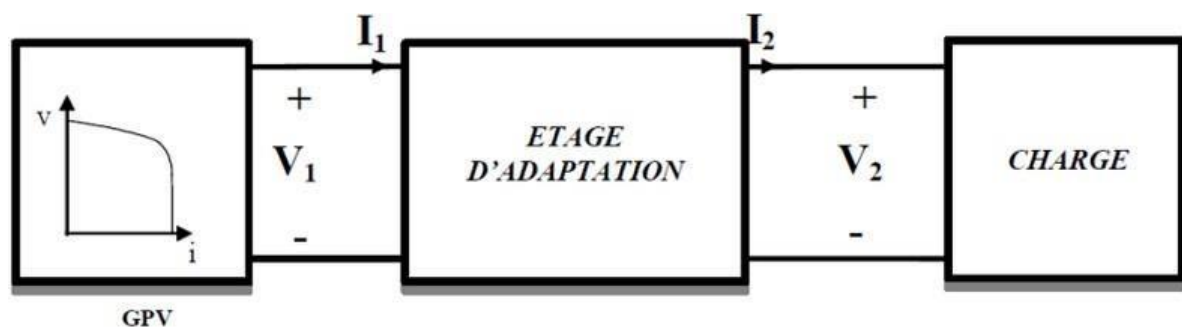


Figure 2.2 : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [2]

Le rendement total de l'étage l'adaptateur entre le GPV et la charge DC est composé de types rendements reliés à chaque composant de la chaîne. Le **rendement maximum** du panneau solaire  $\eta_{PV}$  est défini par :

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

$$= \eta_{PV} \frac{P_{max}}{G \cdot A_{eff}} \quad (2.1)$$

Où :

- $P_{max}$  : le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau.
- $G$  : l'irradiante ( $W/m^2$ )
- $A_{eff}$  : la surface effective du panneau PV.

Le type d'adaptateur le plus courant utilisé en PV est un convertisseur DC/DC. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle est noté  $\eta_{MPPT}$  (Rendement MPPT) permet de mesurer l'efficacité de la commande qui contrôle le convertisseur statique afin que le module PV fournisse la puissance maximale.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{max}} \quad (2.2)$$

Enfin, le rendement du convertisseur noté  $\eta_{conv}$  est défini par :

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P} \quad (2.3)$$

Avec  $P_{out}$  la puissance délivrée en sortie du convertisseur et le rendement total de la chaîne de conversion  $\eta$  total est donné par :

$$\eta_{Total} = \eta_{PV} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{conv} \quad (2.4)$$

### 3 Convertisseur DC/DC :

La figure 2.3 représente un convertisseur DC/DC, qui peut servir d'interface entre la source et la charge.

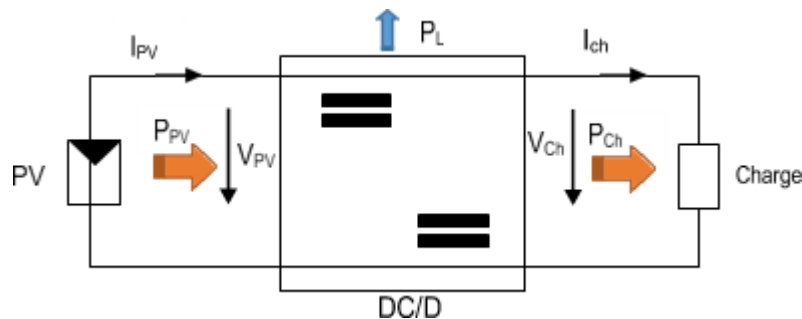


Figure 2.3 : Convertisseurs DC/DC

Dans des applications de grande taille et à distance, un convertisseur DC/DC peut être installé pour corriger les conditions de chute de tension et de tension DC. En d'autres termes, un convertisseur DC/DC prendra une tension d'entrée DC, le filtre puis produira une tension de sortie DC régulée. Selon le modèle, un convertisseur DC/DC peut également augmenter ou diminuer la tension DC/DC : par exemple, passer d'une entrée 48 V à une sortie 24 V.

De nombreux facteurs, y compris la taille et la longueur du câble, ainsi que le bruit électrique, peuvent affecter la tension de sortie DC d'une alimentation électrique. Les câbles longs sont nécessaires pour connecter tout l'équipement de commande du système, notamment dans les applications de grande taille, Les courants de crête, comme les moteurs au démarrage, peuvent encore augmenter la perte de tension, même si la taille du câble est adaptée à la charge. Une solution testée et approuvée pour ces problèmes est un convertisseur DC/DC.

Il existe différents types de convertisseurs DC/DC. Le tableau ci-dessous illustre la complexité de chaque type de convertisseur :

Tableau 2.1 : Complexité de chaque type de convertisseur DC/DC

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

**3.1 Types des convertisseurs :**

**3.1.1 Convertisseurs Buck :**

Un convertisseur abaisseur est représenté à la figure 2.4. Il est composé de la source de tension d'entrée DC  $V_s$ , de l'inductance de suralimentation  $L$ , de l'interrupteur commandé  $S$ , de la diode  $D$ , du condensateur de filtrage  $C$  et de la résistance de charge  $R$ . La figure 2.5 montre les formes d'onde du convertisseur. Lorsque l'interrupteur  $S$  est à l'état passant, le courant de l'inductance de suralimentation augmente linéairement et la diode  $D$  est désactivée. Lorsque l'interrupteur  $S$  est ouverte, la diode libère l'énergie stockée dans l'inductance vers le circuit RC de sortie.

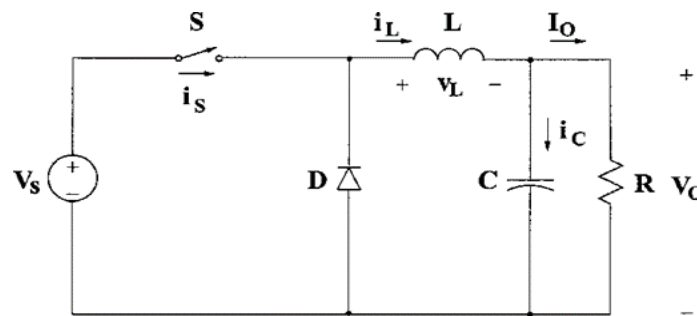


Figure 2.4 : Circuit électrique de base du convertisseur de Buck

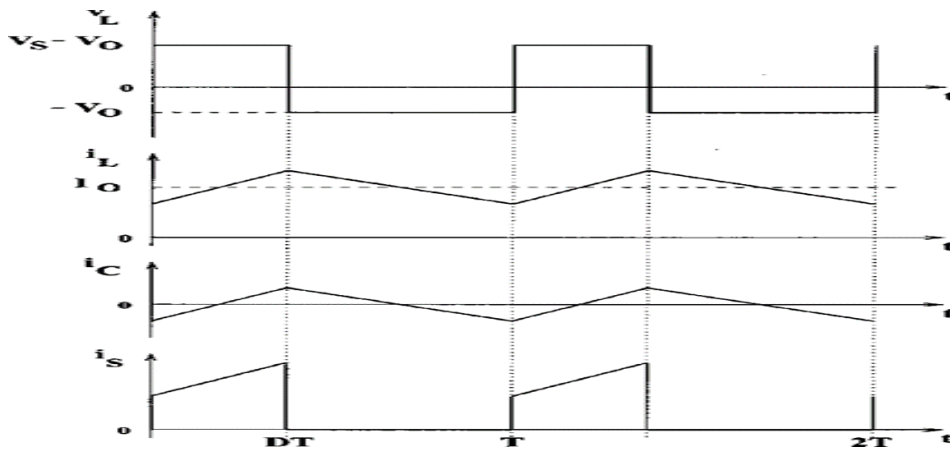


Figure 2.5 : Formes d'onde du convertisseur Buck

L'application de la loi de Faraday comme l'inducteur de suralimentation :

$$(V_s - V_0) DT = -V_0(1 - D) T \tag{2.5}$$

En conséquence, la fonction de transfert de tension semble se poursuivre.

$$M_v = \frac{V_0}{V_s} \tag{2.6}$$

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

Il peut être vu à partir d'équation 2.6 que la tension de sortie est toujours inférieure à la tension d'entrée. En ce qui concerne le courant d'inductance, les convertisseurs DC/DC peuvent fonctionner dans deux modes différents. Le courant d'inductance est toujours supérieur à zéro est illustré. Le convertisseur peut entrer en mode de conduction discontinue (DCM) lorsque la valeur moyenne du courant de sortie est faible ( $R$  élevé) et/ou la fréquence de commutation  $f$  est faible. Pendant une partie de la période de commutation du DCM, le courant d'inductance est nul. Pour son rendement élevé et sa bonne utilisation des commutateurs à semi-conducteurs et des composants passifs, le CCM est préféré. Étant donné que l'ordre dynamique du convertisseur est réduit (l'énergie stockée dans l'inductance), Comme l'ordre dynamique du convertisseur est réduit (l'énergie stockée dans l'inductance est nulle au début et à la fin de chaque période de commutation), le DCM peut être utilisé dans des applications avec des exigences de contrôle particulières. En raison des algorithmes de contrôle différents, il est rare de mélanger ces deux modes de fonctionnement. La valeur de l'inductance du filtre pour le convertisseur abaisseur est donnée par

$$L_b = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.7)$$

Pour les valeurs  $D = 0,5$ ,  $R = 10 \Omega$  et  $f=100 \text{ kHz}$  ; la limite est  $L_b = 25 \mu\text{H}$  ; Pour  $L > L_b$  ; le convertisseur fonctionne dans le CCM.

Dans le CCM, le courant d'inductance du filtre  $i_L$  est composé d'une composante  $i_0$  et d'une composante triangulaire alternative superposée. Presque tout ce composant alternatif circule sous forme de courant  $i_C$  à travers le condensateur de filtrage. La tension de sortie CC  $V_0$  subit une légère ondulation par le courant  $i_C$ . La capacité du filtre  $C$  doit être supérieure si la valeur crête à crête de la tension d'ondulation est limitée en dessous d'une valeur  $V_r$  spécifique.

$$C_{min} = \frac{(1-D)V_0}{gV_r L f^2} \quad (2.8)$$

Les équations de conception de  $C_{min}$  convertisseur abaisseur sont les équations (2.7) et (2.8). La plage de résistance de charge  $R$  et les tensions DC d'entrée et de sortie (d'où le rapport cyclique  $D$ ) sont généralement déterminées par des spécifications préliminaires. Le concepteur doit déterminer les valeurs des composants passifs  $L$  et  $C$ , ainsi que la fréquence de commutation  $f$ . La valeur de l'inductance du filtre  $L$  est déterminée. En utilisant l'équation 2.7 la condition CCM = DCM. La condition d'ondulation de tension équation 2.8 donne la valeur

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

condensateur de filtrage  $C$ . Il est souhaitable d'utiliser de petits composants passifs pour la compacité et les faibles pertes de conduction d'un convertisseur. Cela peut être accompli avec une fréquence de commutation élevée  $f$ , comme le démontrent les équations pour les équations (2,8) et (2,7). Cependant, les pertes de commutation et le type d'interrupteur à semi-conducteurs utilisés limitent la fréquence de commutation. Il convient également de noter que les effets des composants parasites dans le convertisseur, en particulier la résistance série équivalente du condensateur, peuvent modifier les valeurs de  $L$  et  $C$ .

### 3.1.2 Convertisseurs Boost :

Un convertisseur d'ascenseur ou un élévateur PWM. Il est constitué d'une source de tension DC entrante  $V_s$ , d'une inductance de surtension  $L$ , d'un interrupteur contrôlé  $S$ , d'une diode  $D$ , d'un condensateur filtrant  $C$  et d'une résistance de charge

$R$ . Les différentes formes d'onde du convertisseur dans DCM sont représentées à la figure 2.6.

Lorsque l'interrupteur  $S$  est dans l'état de passage, le courant de l'inductance de surcharge augmente linéairement et la diode  $D$  est désactivée.

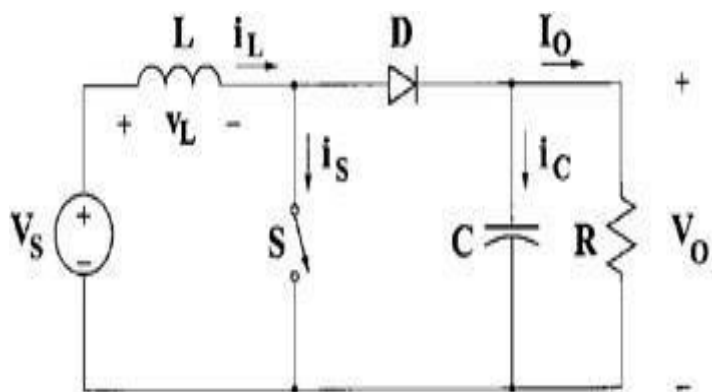
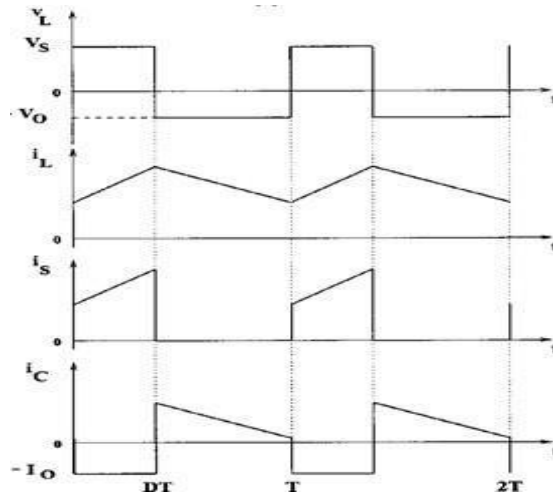


Figure 2.6 : Circuit électrique de base du convertisseur Boost

Ce moment précis. Lorsque l'interrupteur  $S$  est ouverte, la diode libère l'énergie stockée dans l'inductance vers le circuit RC de sortie.



*Figure 2.7 : Formes d'onde du convertisseur Boost*

Pour appliquer la loi de Faraday pour l'inducteur de suralimentation :

$$V_S D T = (V_0 - V_S) (1 - D) T \quad (2.9)$$

- À partir de laquelle la fonction de transfert de tension continue s'avère être :

$$Mv = \frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.10)$$

Comme le nom du convertisseur l'indique, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée.

- Le convertisseur élévateur fonctionne dans le CCM pour  $L > L_b$  où :

$$L_b = \frac{(1 - D) R}{2f} \quad (2.11)$$

Le courant fourni au circuit RC de sortie est discontinu, comme le montre la Figure 2.7. Par conséquent, par rapport aux convertisseurs abaisseur, un condensateur filtre plus grand est nécessaire pour limiter l'ondulation de la tension de sortie. Lorsque la diode D est éteinte, le condensateur de filtrage doit fournir le courant continu de sortie à la charge. La capacité minimale du filtre qui résulte de l'ondulation de tension V est indiquée par :

$$C_{min} = \frac{V_0}{(V + Rf)} \quad (2.12)$$

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

Avec  $D = 0,5$  ;  $\frac{V_r}{V_o} = 1\%$  ;  $R = 10 \Omega$  ;  $f = 100\text{kHz}$ .

- La capacité minimale du convertisseur élévateur est  $C_{min} = 50 \mu F$ .
- Le convertisseur élévateur n'a pas de version de transformateur (isolée) populaire.

### 3.1.3 Convertisseur Buck-boost :

Une source de tension, un élément de commutation, une bobine, une diode, un condensateur et une charge parallèle à l'entrée sont tous inclus dans le circuit. Les convertisseurs Buck/Boost sont des convertisseurs inversés DC/DC qui transforment la tension d'entrée en polarité inversée. La polarité de la tension a changé en passant de l'extrémité positive vers l'extrémité négative, comme illustré dans la figure 2.8. Un simple circuit conducteur permet de commuter l'élément de commutation du circuit.

Un amplificateur de différence calcule la différence entre la valeur de tension obtenue à partir de la sortie et la valeur de tension souhaitée. Cette différence est grande par rapport à la marque de différence du triangle ou, si ce n'est pas petit, l'état de transmission/interruption de l'élément de commutation est vérifié. Les circuits du composeur Buck/Boost, comme les autres composeurs commutés, sont examinés en deux étapes en fonction de l'état de transmission/interruption de l'élément de commutation.

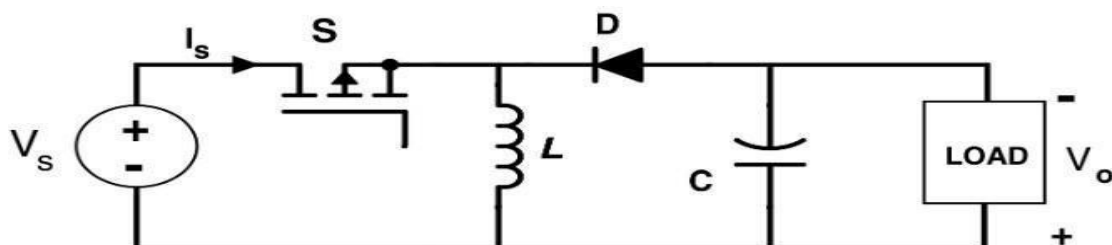


Figure 2.8 : Circuit électrique idéalisé du convertisseur Buck- boost

## 4 Méthode d'extraction du point de puissance maximum (MPPT) :

Une étape cruciale d'un système photovoltaïque est le suivi du point de puissance maximale (MPP) d'un réseau photovoltaïque. En effet, de nombreuses méthodes MPPT ont été introduites et de nombreuses variantes ont été proposées pour surmonter certains inconvénients. La détermination de la meilleure technique à utiliser lors de la mise en œuvre d'un système PV peut être difficile en raison du grand nombre de méthodes proposées. En termes de complexité, de nombre de capteurs nécessaires, de mise en œuvre numérique ou analogique, de vitesse de convergence, de capacité de suivi et de rentabilité, les méthodes diffèrent toutes. De plus, le type d'application peut affecter considérablement la sélection de l'algorithme MPPT.

**4.1 Principe de la commande MPPT :**

L'algorithme utilisé dans les premières commandes MPPT était assez simple. En effet, la puissance de calcul disponible à l'époque était limitée, et les applications, en particulier celles destinées à l'espace, étaient beaucoup moins soumises aux contraintes de variation de température et de clarté que les applications destinées à l'utilisation terrestre. Le principe photovoltaïque a été décrit pour la première fois par AF. Bohringer. Cet instruction est basé sur un mécanisme de contrôle adaptatif qui permet au système de maintenir son point de puissance maximum (PPM). Le mécanisme de contrôle adaptatif est décrit ci-dessous :

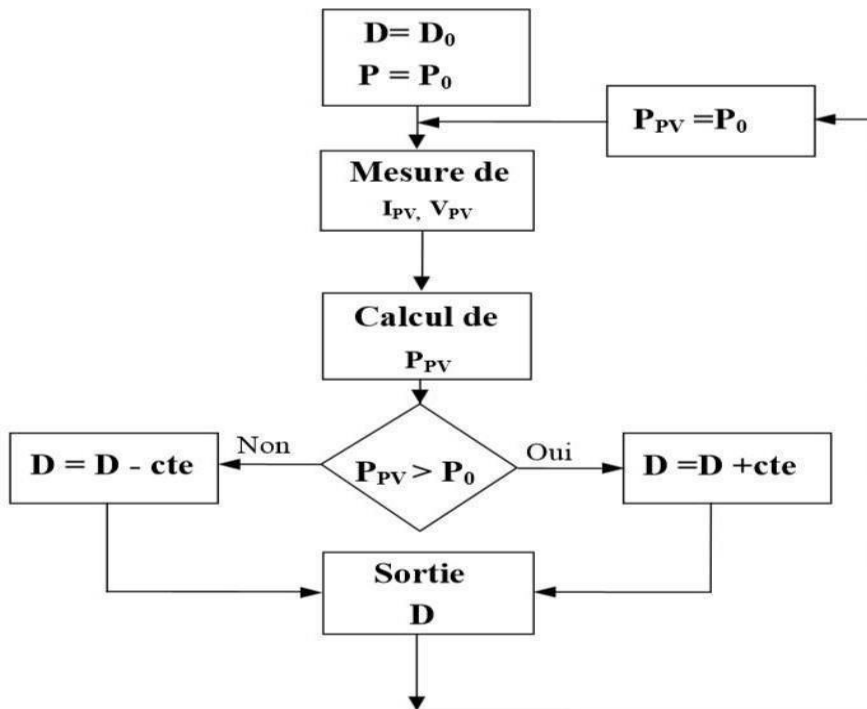


Figure 2.9 : Principe de la première technique MPPT numérique [2]

Cet algorithme calcule la puissance au moment T sur la base de mesures IPV et VPV et la compare à la puissance stockée en mémoire, qui correspond au temps  $tn - 1$ . A partir de là, un nouveau cycle D est calculé et appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable d'un point de vue théorique et est utilisé de nos jours sur des algorithmes numériques plus efficaces. Cependant, le temps de réponse et la précision de la recherche PPM ont été améliorés, tout comme un certain nombre de précautions pour éviter de perdre la PPM même temporairement.

### **4.2 Classification des Commandes MPPT :**

Nous pouvons catégoriser les commandes MPPT en termes généraux en fonction du type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant des classes en fonction du type de recherche qu'ils mènent et des paramètres d'entrée de la commande MPPT.

### **4.3 Classification des commandes MPPT selon paramètres d'entrée :**

#### **4.3.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du Cs:**

Il existe plusieurs commandes MPPT qui recherchent le PPM en fonction de l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Les algorithmes d'incrément de conductance utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle appropriée pour le suivi du PPM ou les commandes qui sont basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal ( $V_{pv}$  et  $I_{pv}$ ) et les paramètres caractéristiques du module PV ( $V_c$  et  $I_c$ ). En particulier, les MPPT basées sur logique floue

#### **4.3.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :**

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de  $P_{max}$  est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

### **4.4 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :**

#### **4.4.1 MPPT Indirect :**

Ce type de commande de point de puissance maximale (MPPT) utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ) et la position approximative du point de puissance maximale. De plus, il prend en compte les commandes qui sont basées sur une estimation du point de fonctionnement du GPV basée sur un modèle paramétrique qui a été défini précédemment. De plus, il existe des commandes qui déterminent la tension appropriée en ne tenant compte que des changements de température des cellules mesurés par un capteur. L'avantage de ces ordres est qu'ils sont simples à exécuter. Il s'agit généralement de systèmes peu coûteux et peu précis qui fonctionneront dans des régions où les effets du changement

## **Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT**

climatique sont minimales.

### **4.4.2 MPPT Direct :**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPPT. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance quia une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction.

## **4.5 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée :**

### **4.5.1 Principe des commandes "Hill Climbing" :**

Hill Climbing est une technique de contrôle qui consiste à "monter" le point de fonctionnement le long de la caractéristique de la génératrice qui affiche un maximum. Deux pentes sont disponibles pour cela. Théoriquement, la recherche prend fin lorsque le point de puissance maximum est atteint. Cette méthode est basée sur la caractéristique de puissance en fonction de la relation cyclique P(D). Mathématiquement, la PPM est atteinte lorsque :

$$\frac{dP}{dD} = 0 \quad (2.13)$$

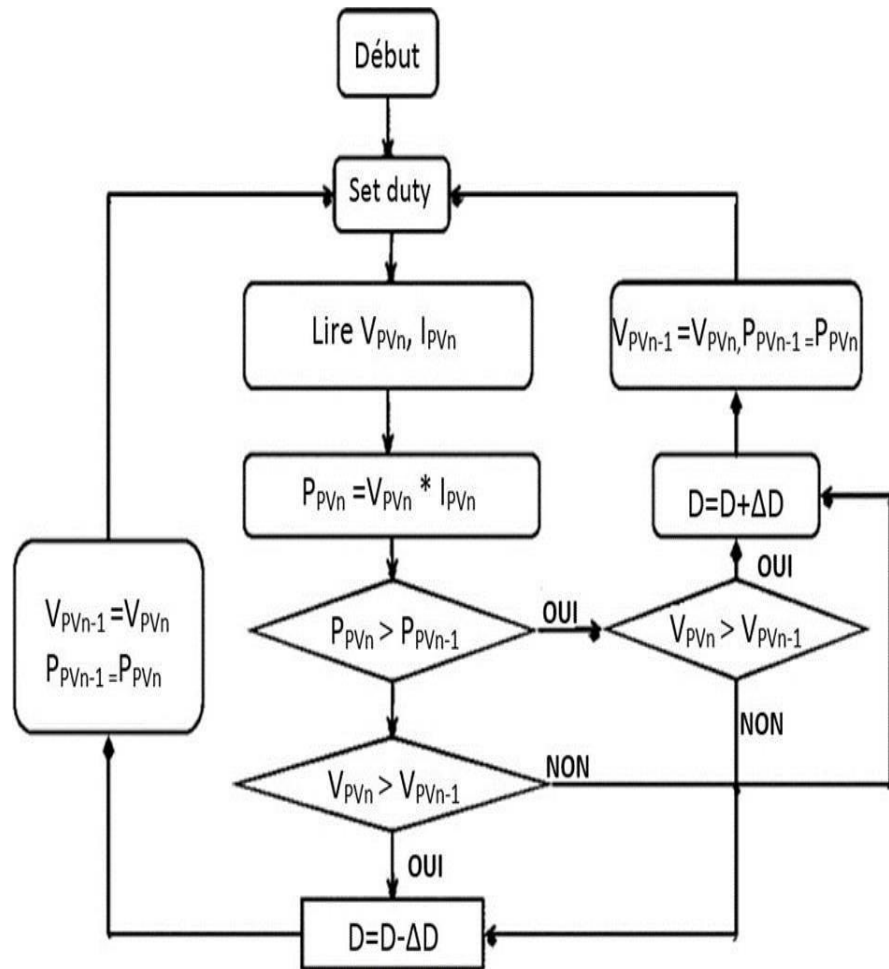


Figure 2.10 : Algorithme type de la commande Hill Climbing [8]

Le fonctionnement de cette commande est illustré sur la figure 2.11. En reprenant la chaîne de conversion PV élémentaire

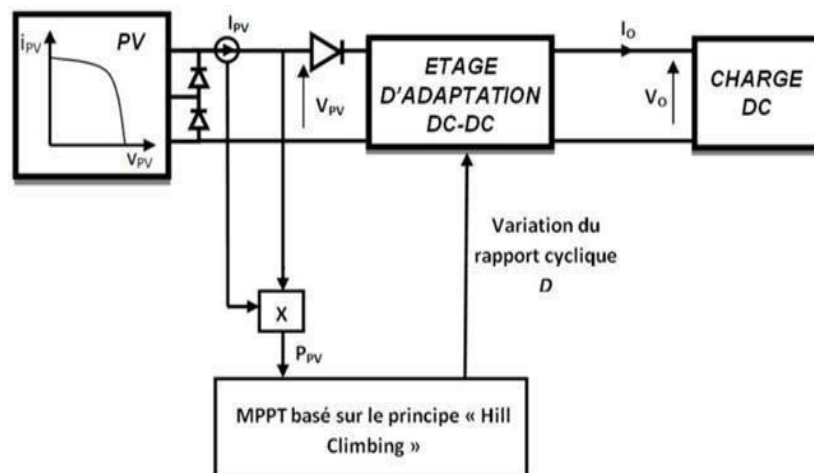


Figure 2.11 : Schéma de principe de la commande Hill Climbing (8)

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

L'avantage de cette dernière stratégie est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Cependant, elle a les mêmes inconvénients que la méthode P&O en termes d'oscillations autour de la PPM dans le régime établi et une perte de fréquence de recherche PPM avec des changements rapides dans les conditions météorologiques.

### **4.5.2 Principe de la commande “perturbé & Observé” (P&O) :**

L'idée de base derrière les commandes P&O MPPT est de perturber la tension  $V_{pv}$  avec une petite amplitude autour de sa valeur initiale, puis d'analyser le comportement de variation de puissance résultante de la tension  $V_{pv}$ . Ainsi, comme l'illustre la figure 2.12, une augmentation positive de la tension  $V_{pv}$  entraîne une augmentation de la puissance  $V_{pv}$ , ce qui indique que le point de fonctionnement est à gauche de la PPM. En revanche, si la puissance diminue, le système dépasse la PPM. Un raisonnement similaire peut être utilisé lorsque la contrainte diminue, D'après ces nombreuses évaluations des effets du changement de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est donc simple de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de le rapprocher de la puissance maximale via une séquence de commande appropriée.

En résumé, si une perturbation de tension provoque une augmentation de la puissance photovoltaïque, la direction de la perturbation demeure constante. En revanche, elle est inversée pour rétablir la convergence vers la nouvelle PWM(PPM). [9]

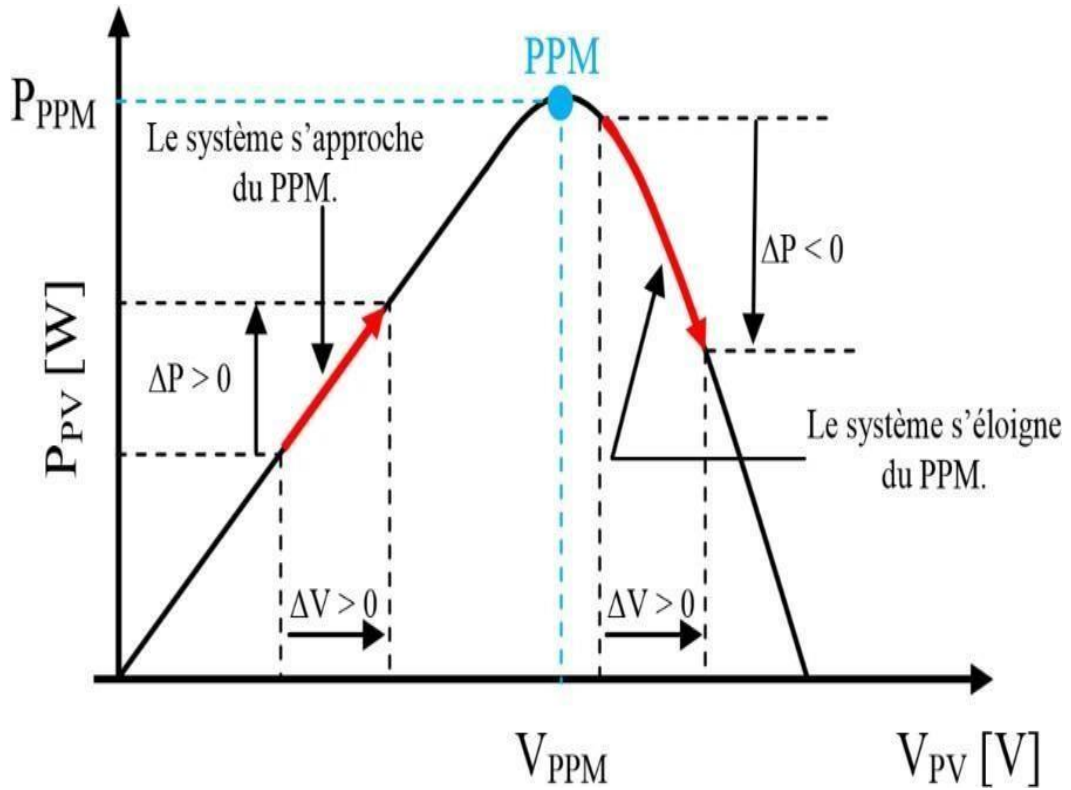


Figure 2.12 : Recherche du PPM par la méthode (P&O) [9]

La figure 2.13 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

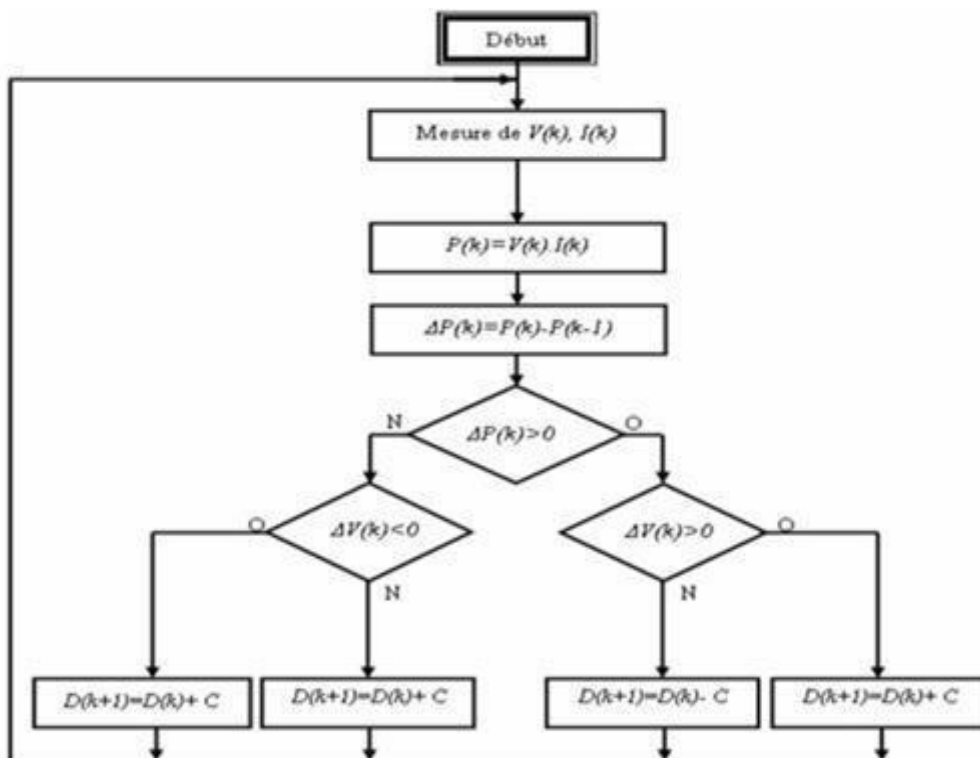


Figure 2.13 : Algorithme type de la méthode P&O [9]

En raison de sa facilité de mise en œuvre, la méthode P&O est largement utilisée aujourd'hui ; cependant, elle présente certains problèmes liés aux oscillations autour de la PPM qu'elle provoque, car la procédure de recherche PPM doit être répétée régulièrement, forçant le système à osciller indéfiniment autour de la PPM une fois atteint. En abaissant la valeur de la variable de perturbation, ces oscillations peuvent être réduites. Cependant, une faible valeur incrémentale ralentit la recherche PPM, donc un compromis entre la précision et la vitesse doit être trouvé. Cela rend difficile l'optimisation de cette commande. Il est bien connu que cette forme de commande permet un rendement plus élevé pendant une journée relativement ensoleillée, lorsque la PPM varie lentement et en fonction du soleil. Cependant, lors d'une journée où il y a de fréquents changements importants dans l'irradiation, cette commande subit plus de pertes en raison du temps qu'il faut à la commande pour répondre afin d'atteindre la nouvelle PPM. [9]

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

En effet, lorsqu'on examine en profondeur ce mode de recherche, on constate un certain nombre d'erreurs d'interprétation en termes de trajectoire à suivre pour atteindre la PPM lorsque des changements brusques de temps ou/et de charge apparaissent, comme le montre la figure 2.14

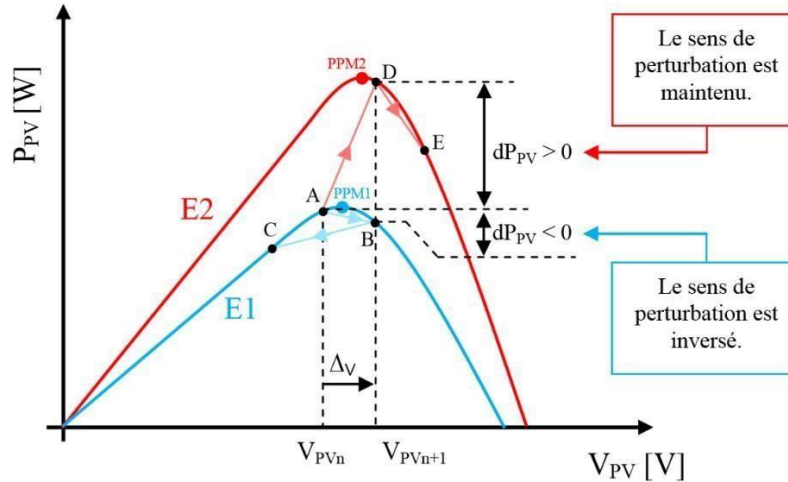


Figure 2.14 : Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation (9)

Pour plus de clarté, prenons l'exemple d'un éclairage donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur  $\Delta V$ , cette dernière bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairage, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. On peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A.

Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques  $P(V)$  d'E1 à E2), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance momentanée. Cependant, dans le pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM.

### **5 Logique floue :**

La logique floue fut développée par Lofti A. Zadeh en 1965 à partir de sa théorie des sous-ensembles flous. Les sous-ensembles flous sont une manière mathématique de représenter l'imprécision de la langue naturelle, objectif l'étude de la représentation des connaissances imprécises, des raisonnements approchés et elle cherche à modéliser les notions vagues du langage naturel pour pallier l'inadéquation de la théorie des ensembles classiques dans ce domaine.

L'architecture générale de ces systèmes est basée sur les règles floues. Une règle floue est une combinaison de variables d'entrées, combinaison qui utilise les opérateurs « flous », tel que le « ET » et le « OU ». Ainsi pour toutes les combinaisons possibles des entrées on va définir une règle.

#### **5.1 Principe de la logique floue :**

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est une description d'un phénomène, contenant généralement des expressions floues, telles que : chaud, froid. Vitesse. Grand, moyen et petit. Le plus grand le plus petit. Positif, zéro, négatif, etc.

Les éléments qui constituent la théorie de base de la logique floue sont : les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance. La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

##### **5.1.1 Variables linguistiques et ensembles flous :**

Une description imprécise d'une situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique qui ne peut être exprimée qu'en termes relatifs ou vagues, c'est-à-dire (grand, petit, positif, négatif, etc...). Ces différentes classes d'expressions floues sont appelées ensemble flous et forment des variables dites linguistiques. Chaque variable linguistique possède un ensemble tel que :  $\{x, T(x), U, G, M\}$ .

Où :

X : Nom de la variable.

T(x) : Ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x.l'univers du

U : Discours associé avec la valeur de base.

G : Règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x.

M : Règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

### 5.1.2 Fonctions d'appartenance :

En général, la fonction d'appartenance s'exerce soit de façon itérative, par la formation, soit en s'appuyant sur l'expérience. Chaque sous-ensemble flottant peut-être représenté par sa fonction. En général, la forme des fonctions appositionnelles dépend de l'application et peut être triangulaire, trapézoïdale ou en forme de cloche comme le montre la Figure 2.15

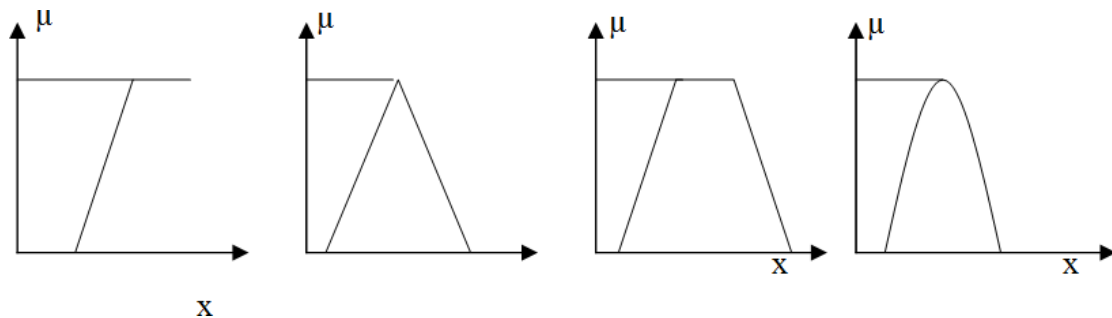


Figure 2.15 : Différents types de fonctions d'appartenance

### 5.1.3 Règles linguistiques :

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue, est d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme Si...alors...Chaque règle a deux parties :

- Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par **Si**.
- Partie conséquente (conclusion) exprimée par **alors**.

L'état antécédente est la description de l'état du système. et La partie conséquente exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter. Chaque règle floue est basée sur l'implication floue.

Il y a plusieurs formes de **Si...alors** ...la forme générale est :

**Si** :(un ensemble de conditions est satisfait).

**Alors** :(un ensemble de conséquences peut être exécuté).

## 5.2 Structure générale d'un système flou :

Le système à base de la logique floue est composé de quatre blocs principaux Figure (31).

- Fuzzificateur
- Base de connaissances floues.
- Engine différence floues.
- Défuzzificateur.

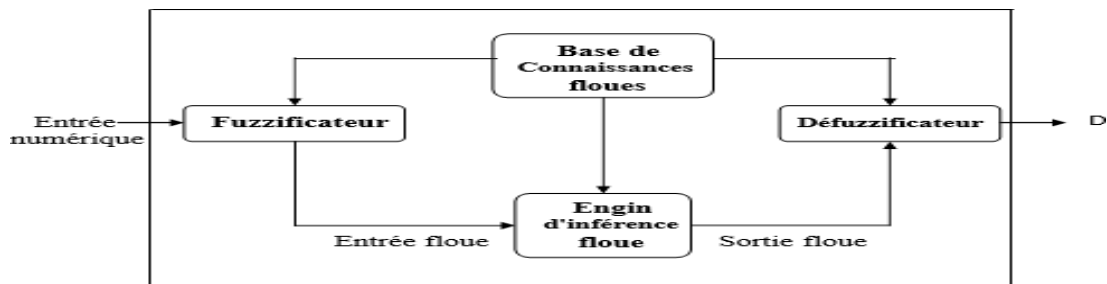


Figure 2.16 : Structure d'un système basé sur la logique floue

### 5.2.1 Fuzzificateur :

Le but de la fuzzification est de définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables qui permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. L'objectif de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues.

### 5.2.2 Inférence floue :

Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sorties par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connectives (et, où). Supposons que le système flou a deux entrées  $x$ ,  $y$  et une sortie  $z$  et que l'on a défini  $n$  règles linguistiques comme suit :  $A, B, C, x, y, z, n$ . Si la méthode  $x=A_n$  et  $y=B_n$  alors  $z=C_n$ .

Soit  $x$ ,  $y$ ,  $z$  sont des variables linguistiques représentant des variables d'état de processus et des variables de contrôle ;  $A_i$ ,  $B_i$  et  $C_i$  ( $i=1, n$ ) sont des sous-ensembles flous définis dans l'ensemble de référence de  $x$ ,  $y$  et  $z$ , respectivement. En général, toute combinaison des opérateurs ou et non peut apparaître dans la condition d'une règle, en fonction des conditions imposées par le système régulé. Il existe plusieurs façons d'implémenter ces opérateurs. Par conséquent, nous introduisons le concept de méthodes d'inférence, donc Les méthodes les plus utilise sont :

- Méthode d'inférence max-min
- Méthode d'inférence max-prod
- Méthode d'inférence somme-prod

Le figure 2.17 représente la méthode d'inférence max-min pour cette méthode d'inférence l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS (l'implication) est réalisée par la formation du minimum. [10]

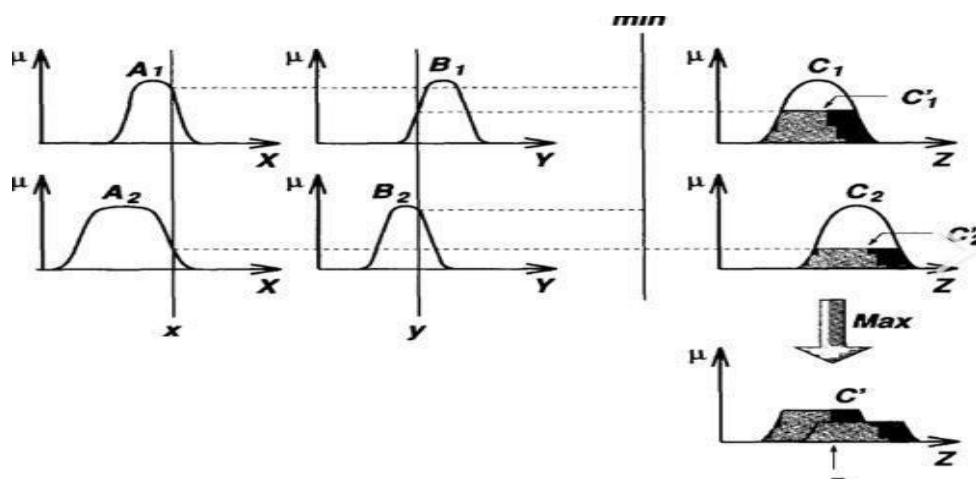


Figure 2.17: Composition MAX-MIN [10]

### 5.2.3 Défuzzification :

La transformation floue en une information déterminée est la défuzzification (concrétisation). De plus, on doit souvent prévoir un traitement du signal et la conversion digitale/analogique. Il y a plusieurs méthodes de défuzzification proposée dans la littérature. Il n'y a pas de stratégie systématique pour choisir parmi l'une de ces méthodes, Sur cette base, il existe plusieurs modèles de régulateur flous comme :

- Régulateur flou de type MAMDANI
- Régulateur flou de type SUGENO
- Modèle flou de LARCEN
- Modèle flou de TSUKAMOT

## 6 Avantages et inconvénients du réglage par logique floue :

### 6.1 Avantages :

Le réglage par logique floue présente les avantages suivants :

- Le non nécessité du modèle du système (souplesse de la méthode)
- Possibilité d'entreprendre des systèmes complexes (systèmes non linéaire et difficile à modéliser).
- La disponibilité de système de développement efficace, soit par microprocesseur ou PC, soit par circuits intégrés. Dans notre projet par l'implémentation est faite sur le circuit FPGA.

### 6.2 Inconvénients :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- L'approche artisanale et asymptotique (implantation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
- L'impossibilité de démontrer de la stabilité du contrôleur.

## 7 Algorithme P&O basée sur la logique floue :

### 7.1 Problèmes liés à l'algorithme P&O à pas fixe :

L'algorithme P&O est largement utilisé dans les systèmes de production d'énergie photovoltaïque en raison de sa mise en œuvre facile et de son faible coût. Cependant, sa principale limitation est le compromis entre la réponse dynamique et les oscillations en régime permanent. En règle générale, l'algorithme P&O est exécuté avec une taille de pas fixe. Si cette taille de pas est plus grande, l'algorithme aura une réponse plus rapide pour suivre le PPM, mais provoquera des oscillations autour du point PPM en régime permanent. Cette situation est inversée lorsque P&O fonctionne avec un pas plus petit. Par conséquent, le suivi de PPM avec un espacement fixe ne fournit pas un compromis satisfaisant entre les oscillations en régime permanent et la réponse dynamique. L'efficacité de l'algorithme P&O dépend des étapes. En particulier, il est difficile de trouver le point idéal pour une réponse dynamique rapide avec de faibles oscillations en régime permanent. [11]

### 7.2 Algorithme P&O basé sur la logique floue :

La méthode MPPT proposée est basée sur l'algorithme P&O classique, implémentations d'algorithmes P&O classiques. L'organisation de l'algorithme P&O modifié basée sur une logique floue avec un pas variable est montrée dans la figure 2.18.

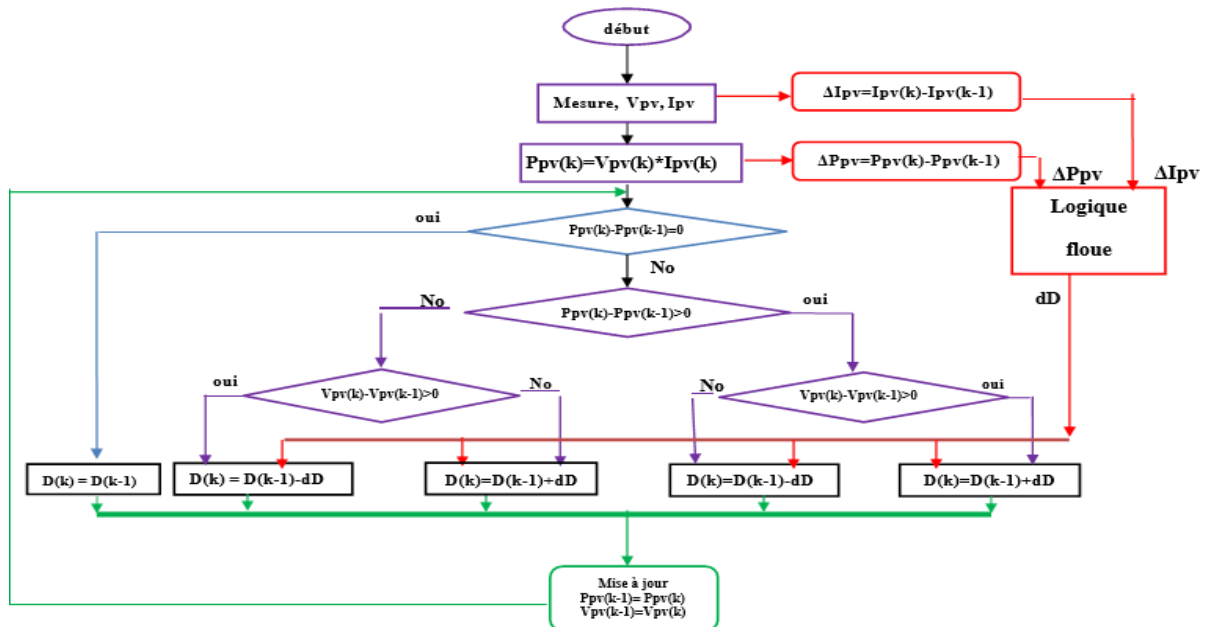


Figure 2.18 : Organigramme de P&O amélioré par logique floue avec un pas variable [11]

L'entrée du contrôleur à logique floue est le changement de la production d'énergie photovoltaïque et le changement du courant  $I_{pv}$ , et le contrôleur ajuste la taille du pas de l'algorithme P&O en fonction de la lumière et de la température. Afin de réduire le coût et la complexité de la mise en œuvre du contrôleur flou, la tension et le courant du GPV sont utilisés

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

Comme entrée de l'algorithme P & O et du bloc FLC. Le principe du P & O traditionnel a été introduit plus tôt, ce qui perturbe périodiquement la sortie tension  $V_{pv}$  et calcule la variation de La puissance de sortie  $P_{pv}$  est obtenue en comparant la puissance instantanée avec celle de la période de perturbation précédente. Si le changement de puissance est positif, la perturbation continuera dans la même direction au cycle de perturbation suivant, sinon, la perturbation se déplacera dans la direction opposée. En répétant ce processus, le point de fonctionnement se déplace progressivement vers le point de puissance maximum. [9]

### 7.3 Contrôleur flou (FLC) utilisé avec un pas variable :

Le contrôleur flou FLC est utilisé pour faire varier en continu le pas d'incrémentacion ou décrémentacion. Le contrôleur flou proposé est basé sur la connaissance préalable du système par un expert. La figure (2.19) montre le schéma de principe d'un P&O amélioré par FLC avec un pas variable. Il se compose de quatre parties, Fuzzification, l'inférence, Défuzzification et les Bases de connaissances. Dans notre mémoire, le FLC construit avec deux variables d'entrée et une sortie. Les variables d'entrée du FLC sont la variation de la puissance du générateur PV,

$P_{pv}$  et la variation du courant du GPV,  $I_{pv}$  tandis que la variable de sortie du FLC est la variation du pas,  $\Delta d$  qui est envoyé à l'algorithme P&O



Figure 2.19 : Bloc du calculateur de pas variable FLC proposé

Les entrées de bloc FLC peuvent être calculées à partir du capteur du courant et de tension. Les variables d'entrées,  $\Delta P_{pv}$  et  $\Delta I_{pv}$ , de bloc FLC proposé peuvent être calculées par les équations Suivantes, où  $P_{pv}(k)$  et  $I_{pv}(k)$  sont respectivement la puissance et le courant du générateur PV et  $V_{pv}(k)$  est la tension du réseau GPV.

$$P_{pv}(k) = V_{pv}(k) * I_{pv}(k) \quad (2.14)$$

$$\Delta P_{pv}(k) = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1) \quad (2.15)$$

$$\Delta I_{pv}(k) = I_{pv}(k) - I_{pv}(k-1) \quad (2.16)$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sorties utilisées dans ce modèle est illustrée dans les Figures 2.20 et 2.21 et 2.22. Toutes les fonctions d'appartenance sont exprimées avec une fonction triangulaire et se composent de cinq sous-ensembles flous qui sont notés NG (Négative Grande), NP (Négative Petite), ZZ (zéro), PP (Positive Petite) et PG (Positive Grande).

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

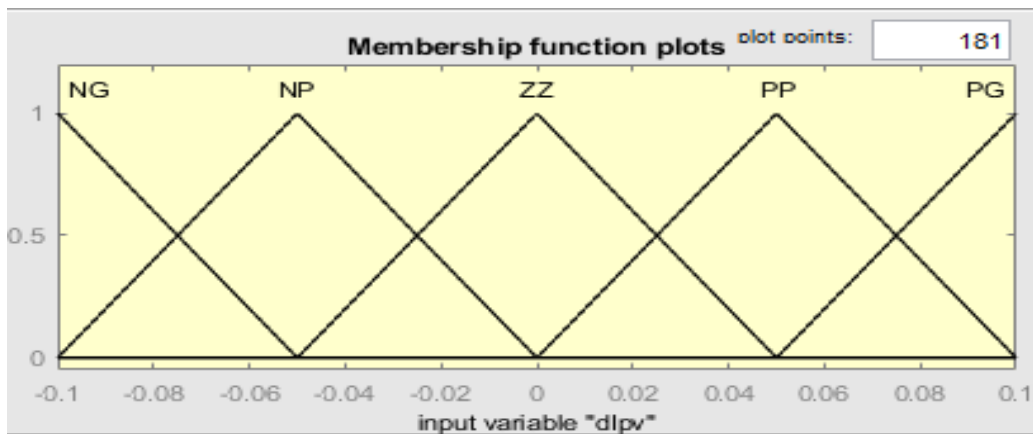


Figure 2.20 : Fonctions d'appartenance des entrées (dlpv)

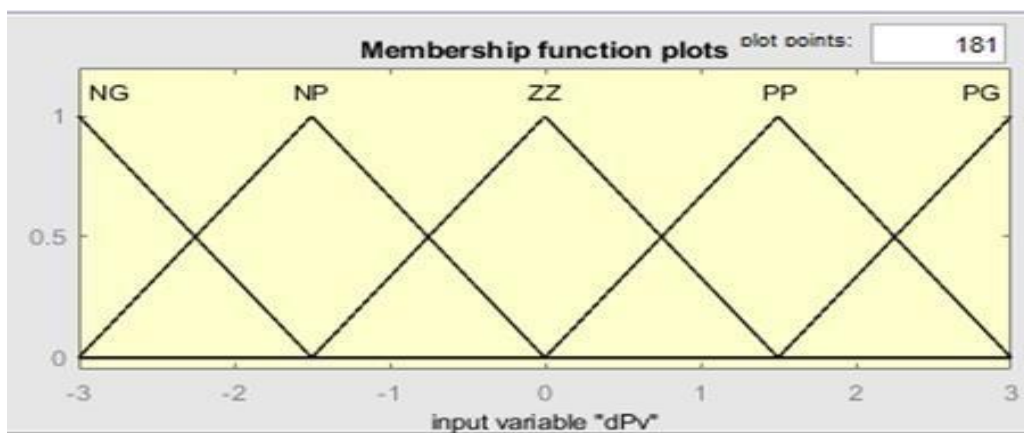


Figure 2.21 : Fonctions d'appartenance des entrées (dPV)

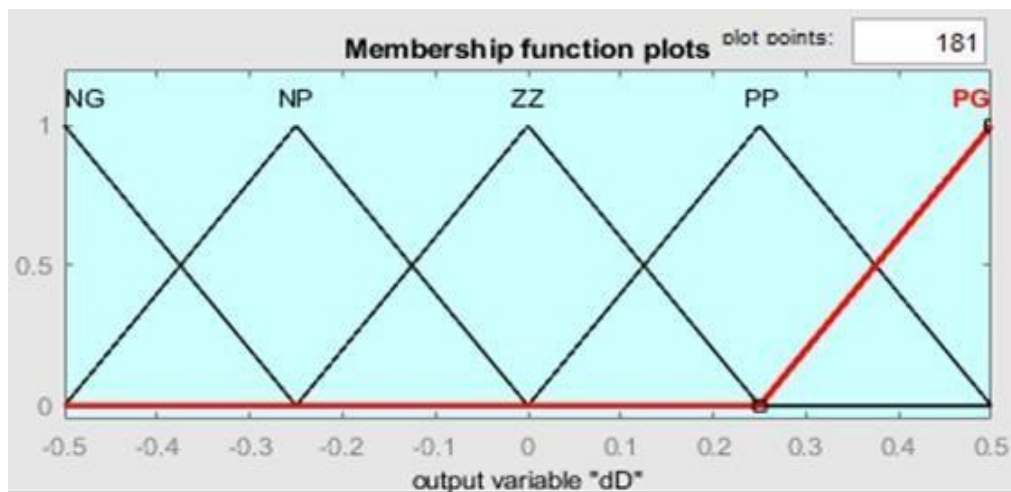


Figure 2.22 : Fonctions d'appartenance de la sortie (dD)

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

La base de règles floues est une collection de règles si-alors que toutes les informations sont disponibles pour les paramètres contrôlés. Puisque le nombre de fonctions d'appartenance de chaque entrée est 5.

Alors les règles d'inférence floue du FLC consistent en 25 règles illustrées dans le tableau 2.2. Ces règles sont utilisées pour déterminer la sortie du contrôleur (le pas variable pour l'algorithme P&O) afin de suivre le point de puissance maximale.

Nous allons appliquer La méthode de Mamdani comme une méthode d'interface floue avec l'opération max-min combinée à la loi floue dans ce travail. La sortie du FLC proposé est défuzzifier pour calculer  $\Delta d$ .

*Tableau 2.2 : Règles utilisées pour déterminer la sortie  $\Delta d$*

$\Delta I_{pv}$	$\Delta P_{pv}$				
	NB	NS	ZZ	PS	PB
NB	NB	NS	NS	ZZ	ZZ
NS	NS	ZZ	ZZ	ZZ	PS
ZZ	ZZ	ZZ	ZZ	PS	PS
PS	ZZ	PS	PS	PS	PB
PB	PS	PS	PB	PB	PB

### **8 Simulation de l'Algorithme dans MATLAB :**

Une bibliothèque de simulation (SIMULINK) permet évalue les performances théoriques du système nous permet de tester les convertisseurs MPPT et DC/DC dans des environnements facilement contrôlés, et leurs performances peuvent être facilement surveillées.

Le développement d'un contrôleur numérique MPPT implique l'intégration d'un dispositif temporel séparé dans un environnement temporel continu.

#### **8.1 Simulation du convertisseur boost avec PV :**

Dans ce qui suit, la simulation d'un convertisseur Boost avec PV.

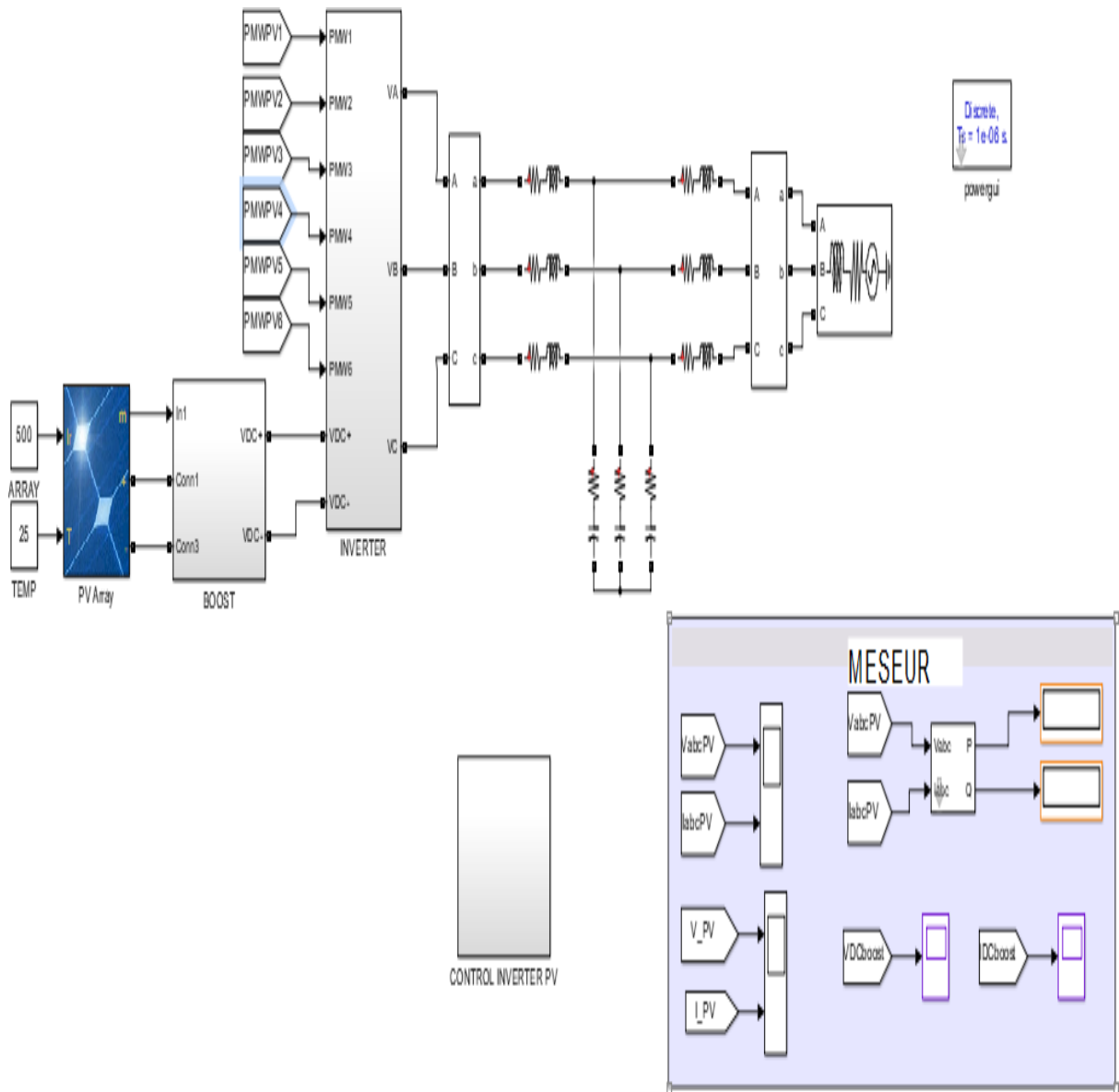


Figure 2.23 : Schéma de simulation du boost

En concevant un contrôleur numérique par simulation, il est possible de s'assurer qu'un convertisseur Boost DC/DC régulerait correctement la tension en cas de changement de courant ou de tension de la source. La simulation permet de sélectionner les meilleurs composants d'alimentation pour assurer une faible oscillation de tension de sortie et des pertes de puissance raisonnables. Avant de mettre en place un contrôleur et de développer le matériel, peuvent évaluer et confirmer en utilisant une simulation en boucle fermée du niveau de puissance et du contrôleur.

## 8.2 Réponse MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur boost :

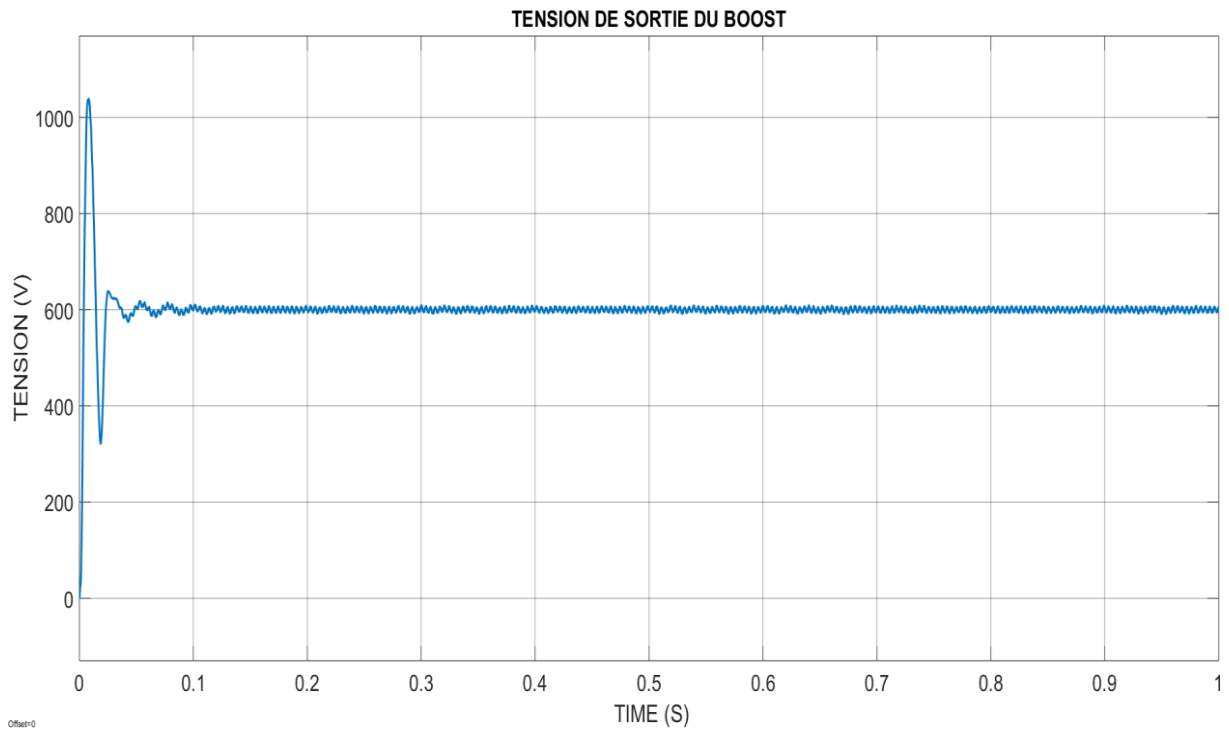


Figure 2.24 : Réponse tension sortie (V) de ce système

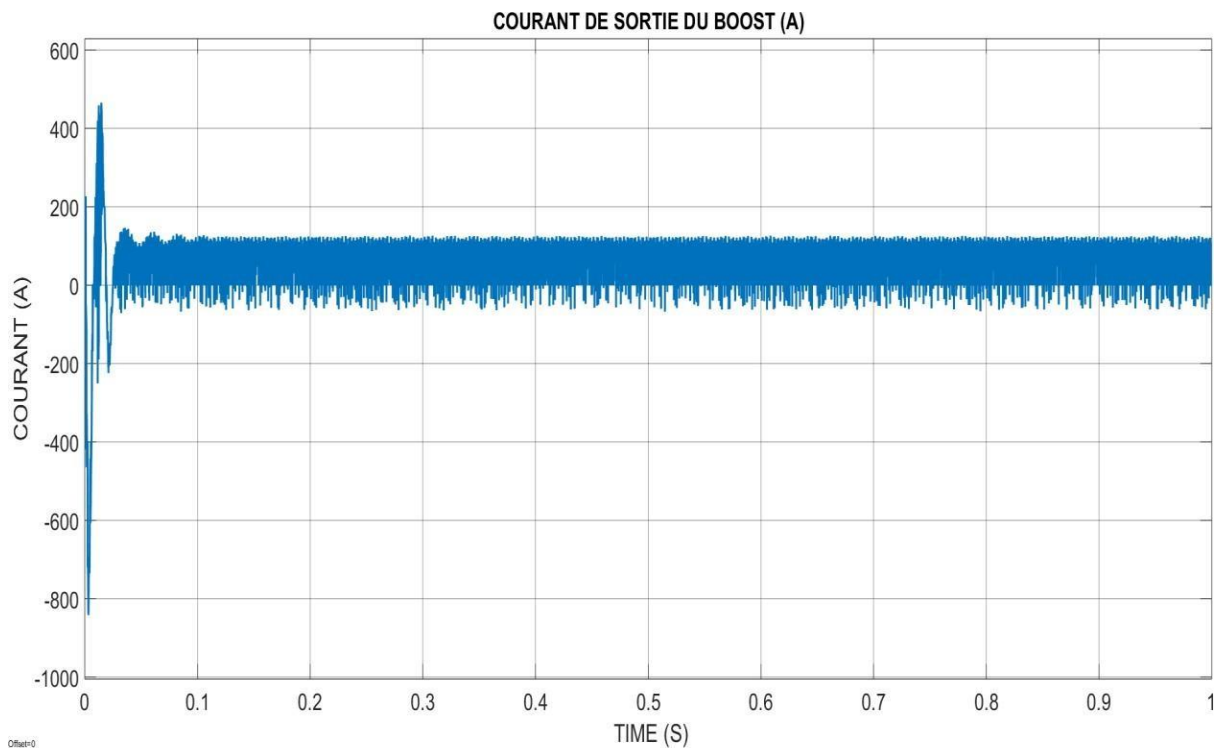


Figure 2.25 : Réponse courant de sortie du système



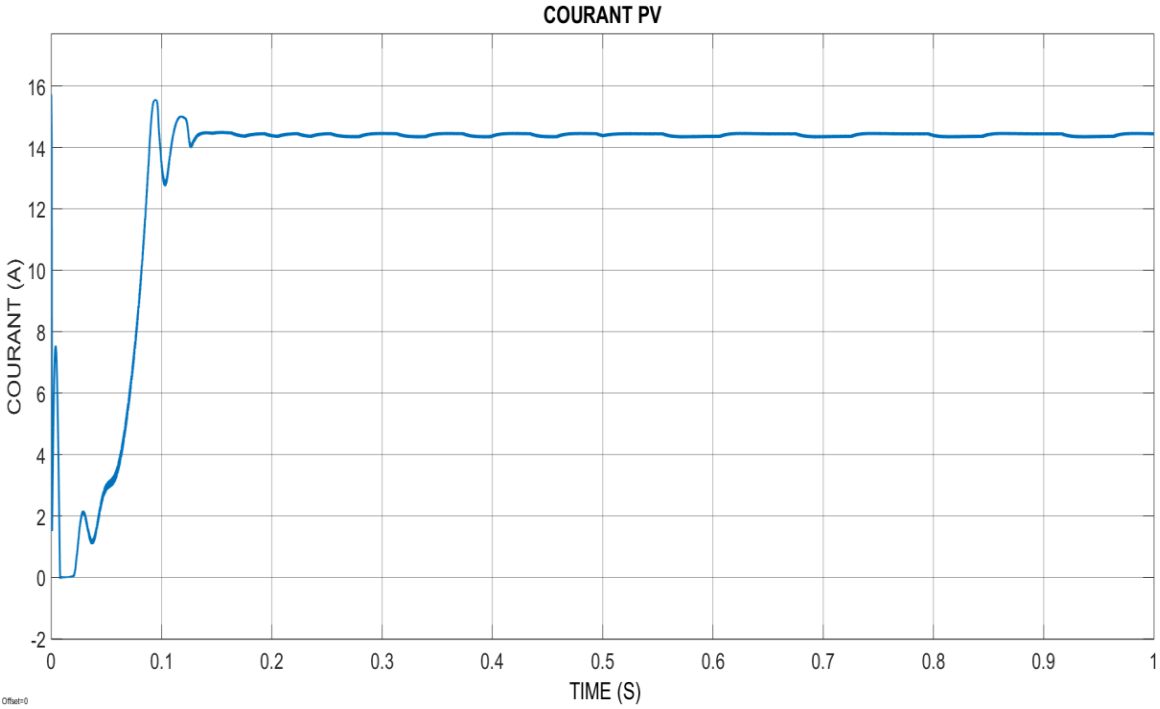


Figure 2.27 : Résultat du courant de PV

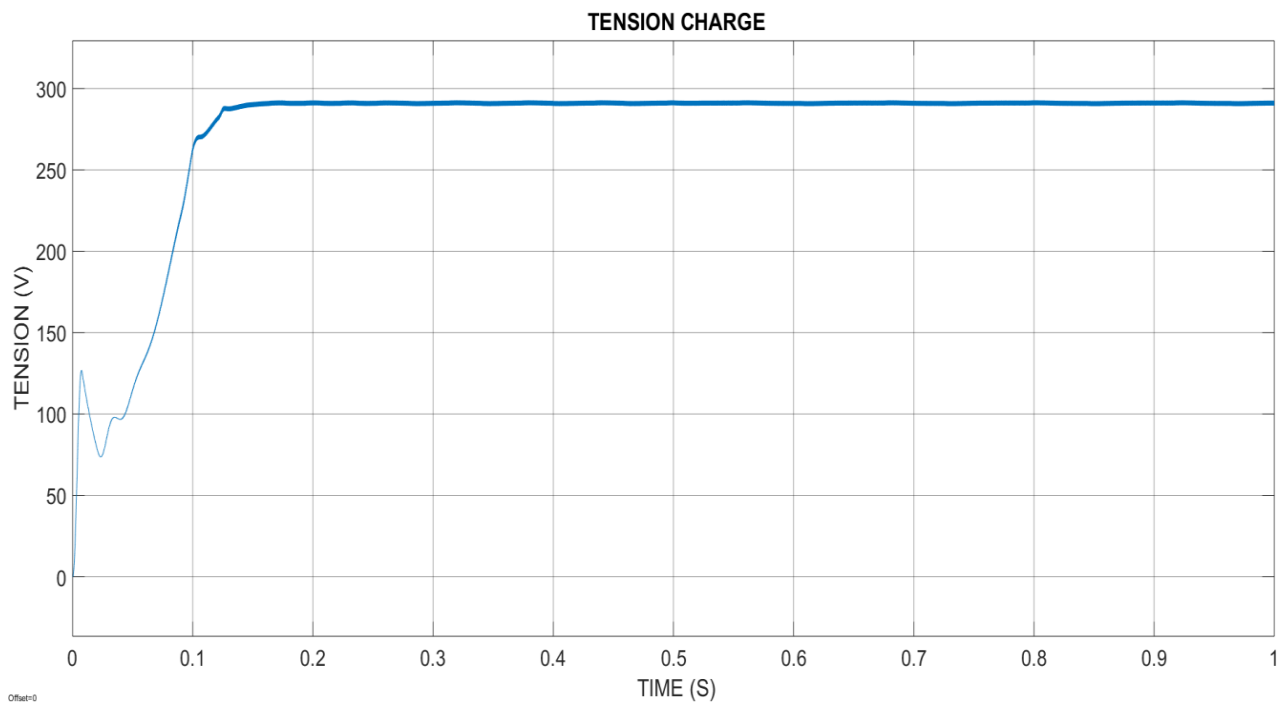
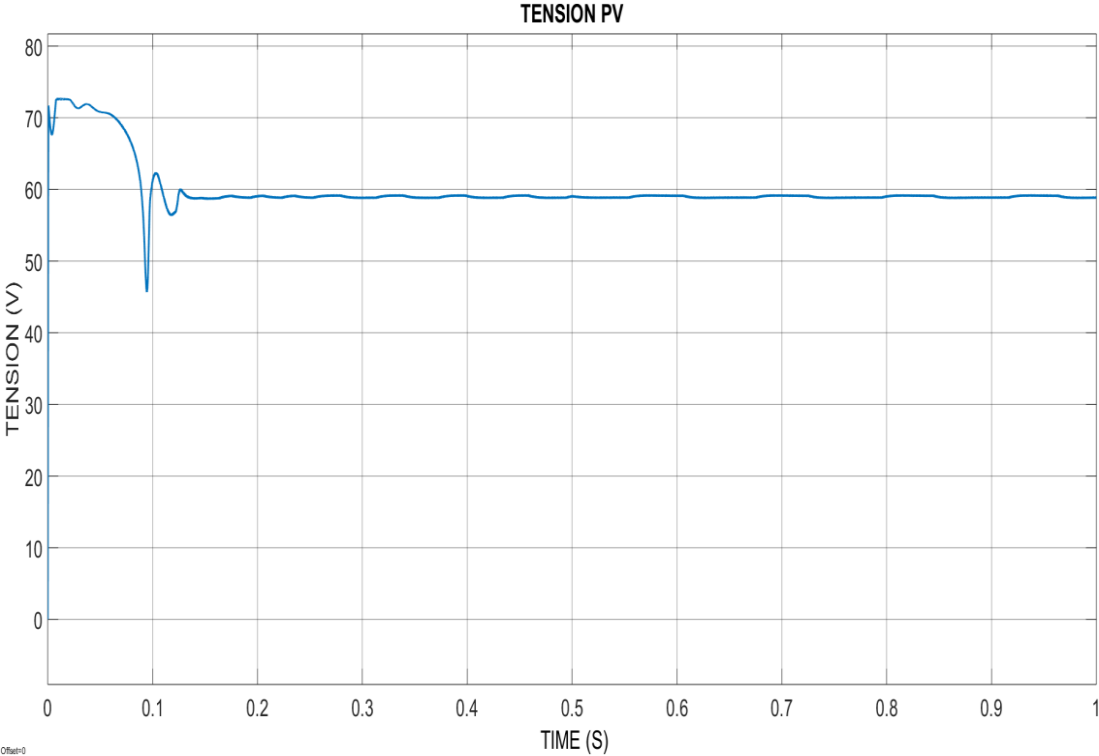
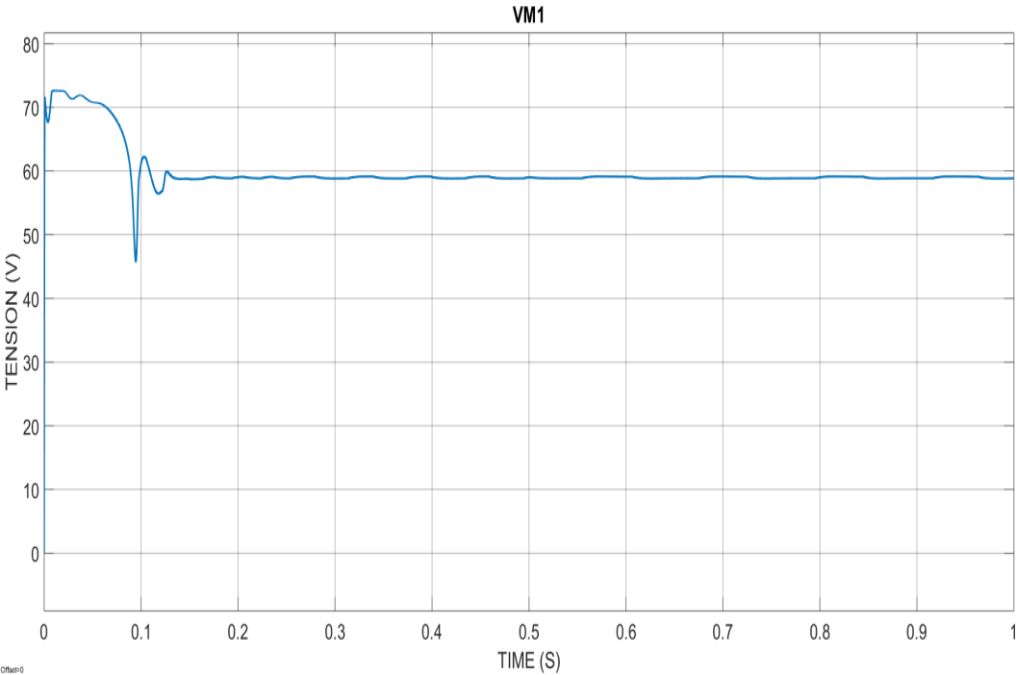


Figure 2.28 : Résultat de la tension charge



*Figure 2.29 : Résultat de la tension PV*



*Figure 2.30 : Résultat de la tension VM1*

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

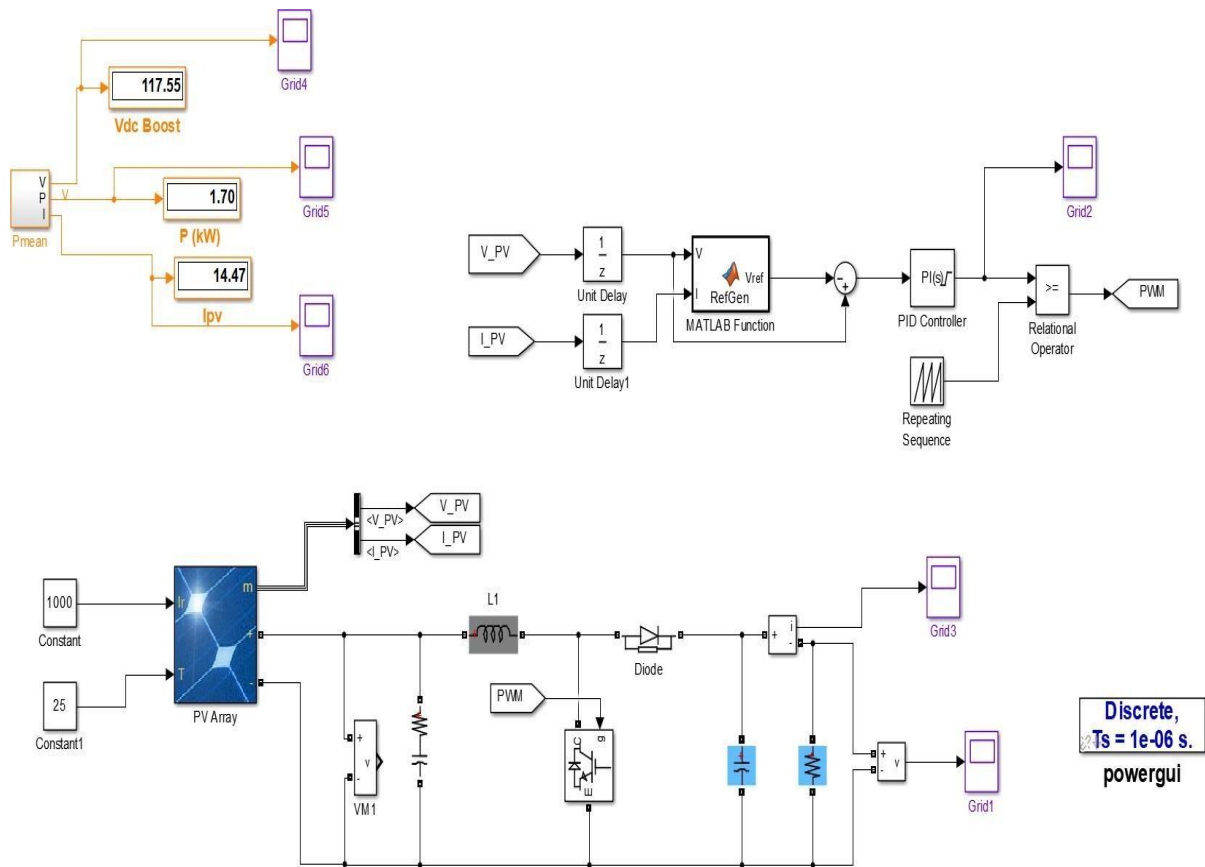


Figure 2.31 : Schéma de simulation du comportement du convertisseur MPPT

Discrete,  
Ts = 0.0001 s.  
powergui

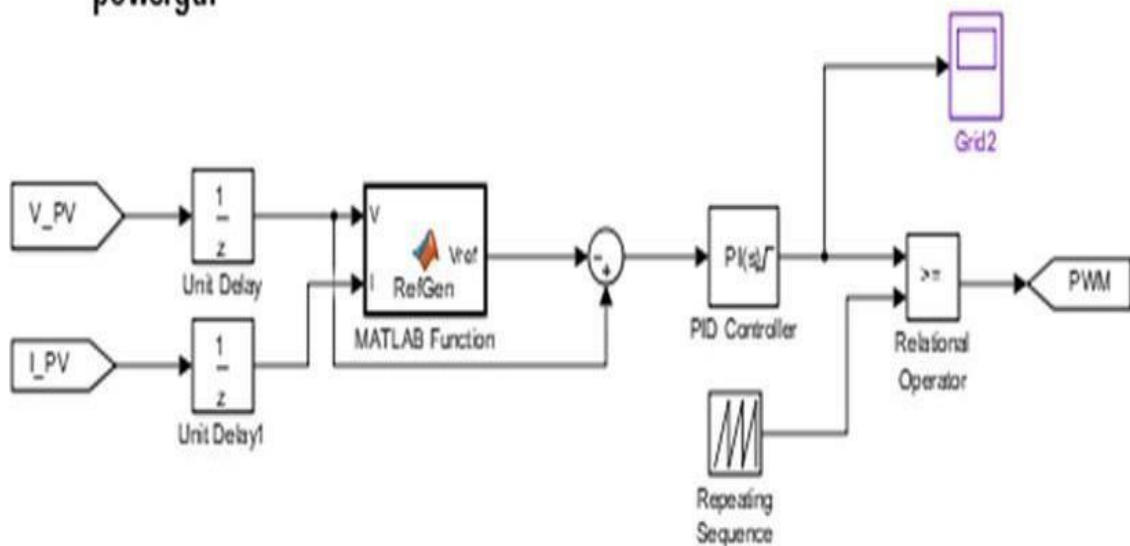


Figure 2.32 : Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM

## Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT

Dans ce qui suit, les paramètres du GPV qui seront utilisés pour la simulation sont donnés sur le schéma dans figure 2.32, avec nous utilisons les coordonnées du MPPT sont (VPV, IPV, PWM).

La fonction de transfert établie dans la section est utilisée CS sur cette réponse que le temps d'établissement  $T_s$  (1 $\mu$ S) est inférieur à 1ms. Le temps d'établissement doit être pris en compte par la commande MPPT. En effet, le cycle du MPPT doit être supérieur au temps d'établissement  $T_s$  afin que la mesure se fasse correctement (sur le régime stationnaire et pas sur le transitoire). Autrement dit, la commande MPPT doit être moins rapide que la dynamique du système.

### 8.4 Réponses des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée:

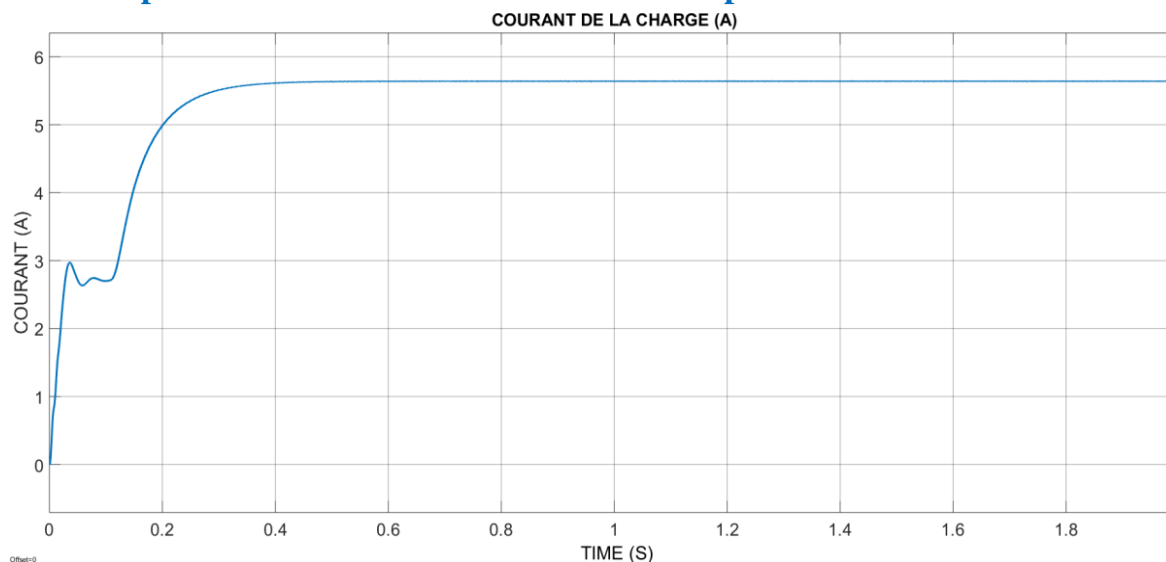


Figure 2.33 : Réponse courant de la charge (IPV) du système

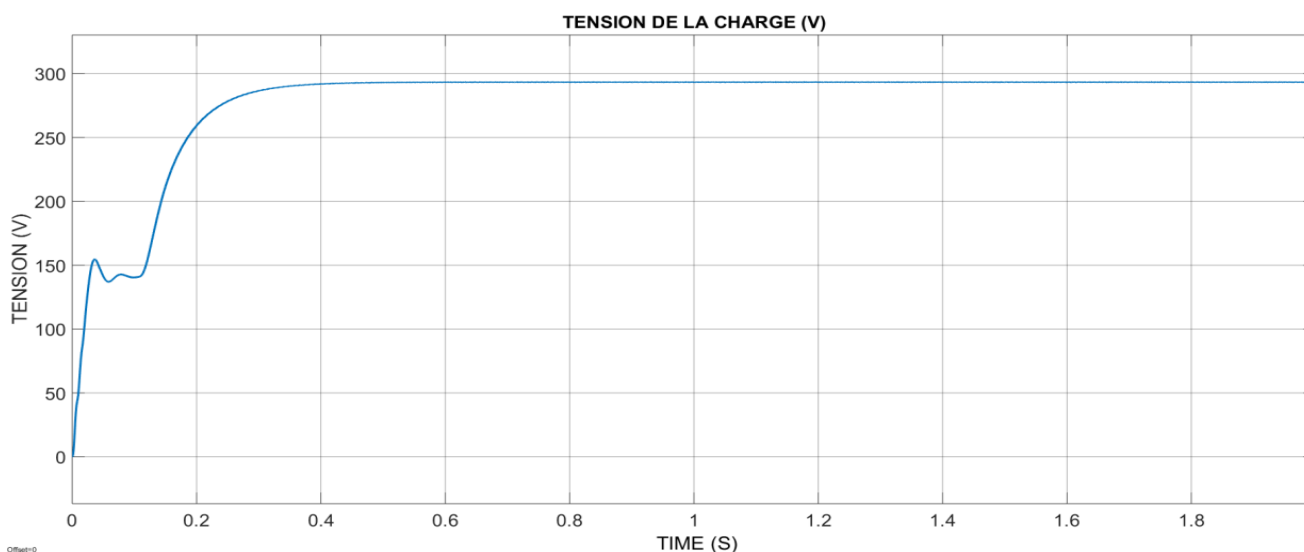


Figure 2.34 : Réponse tension de la charge (VPV) du système

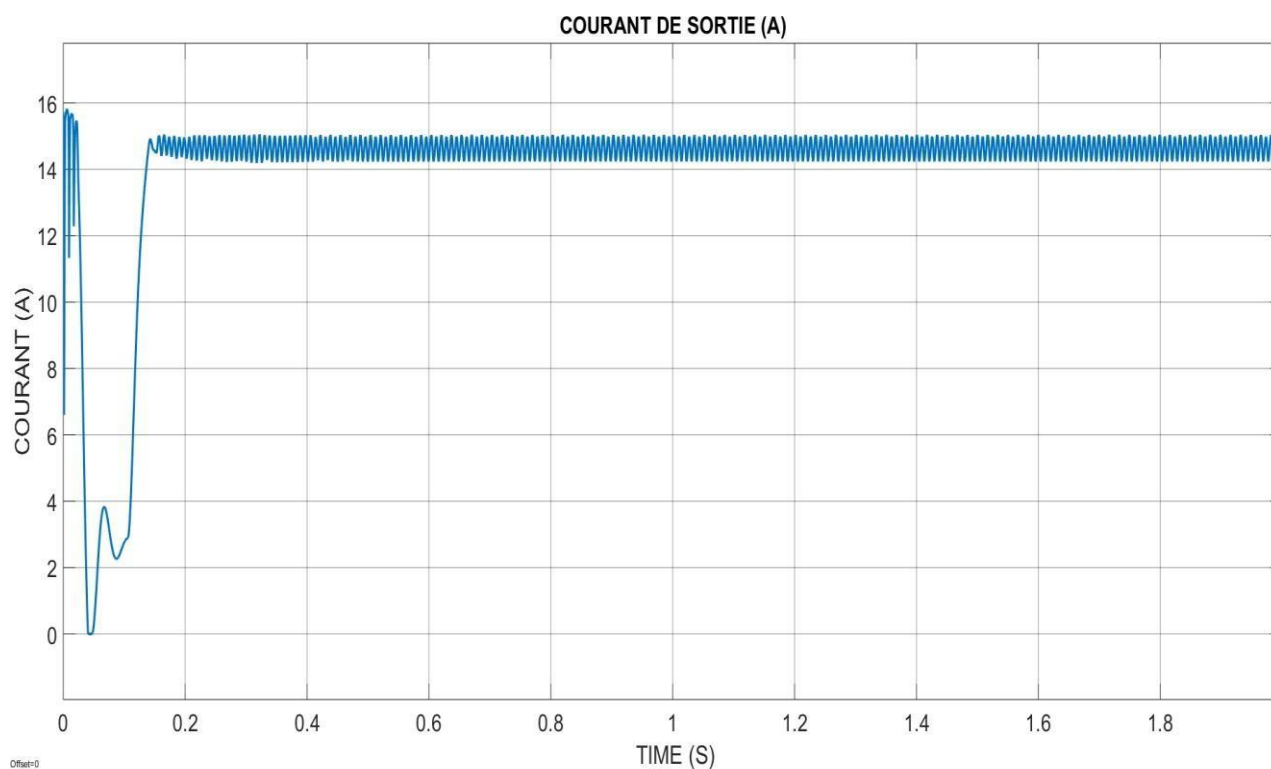


Figure 2.35: Réponse courant sortie (IPV) du système

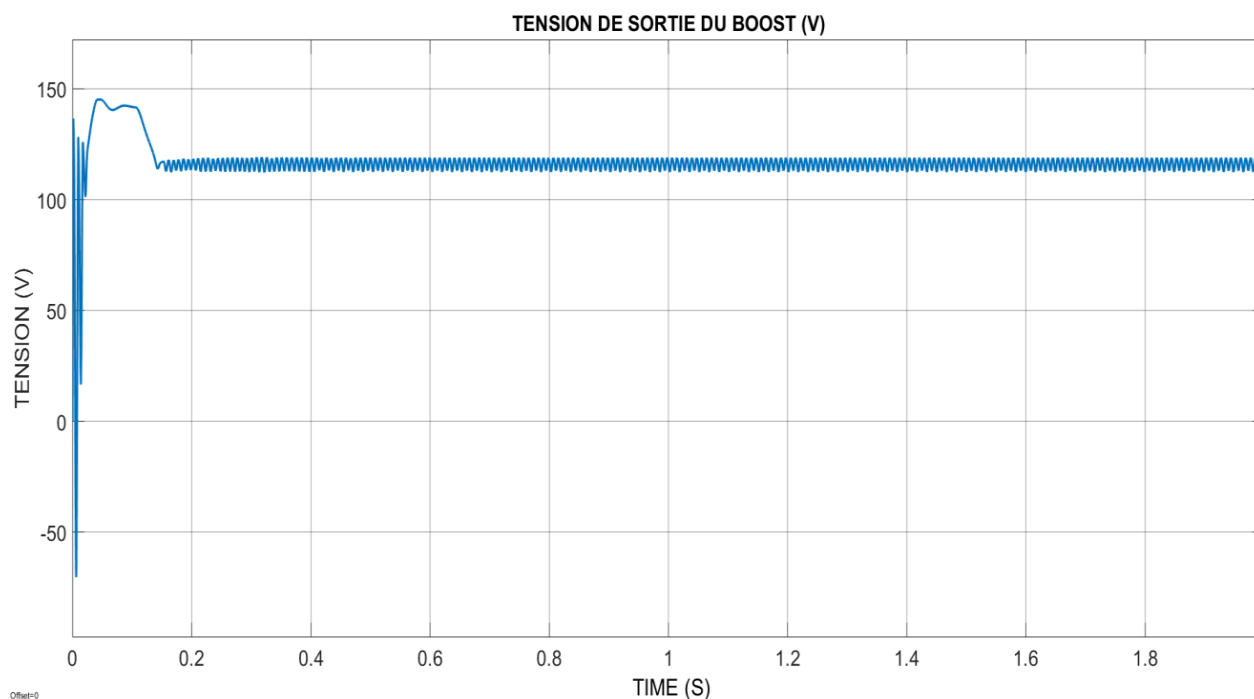
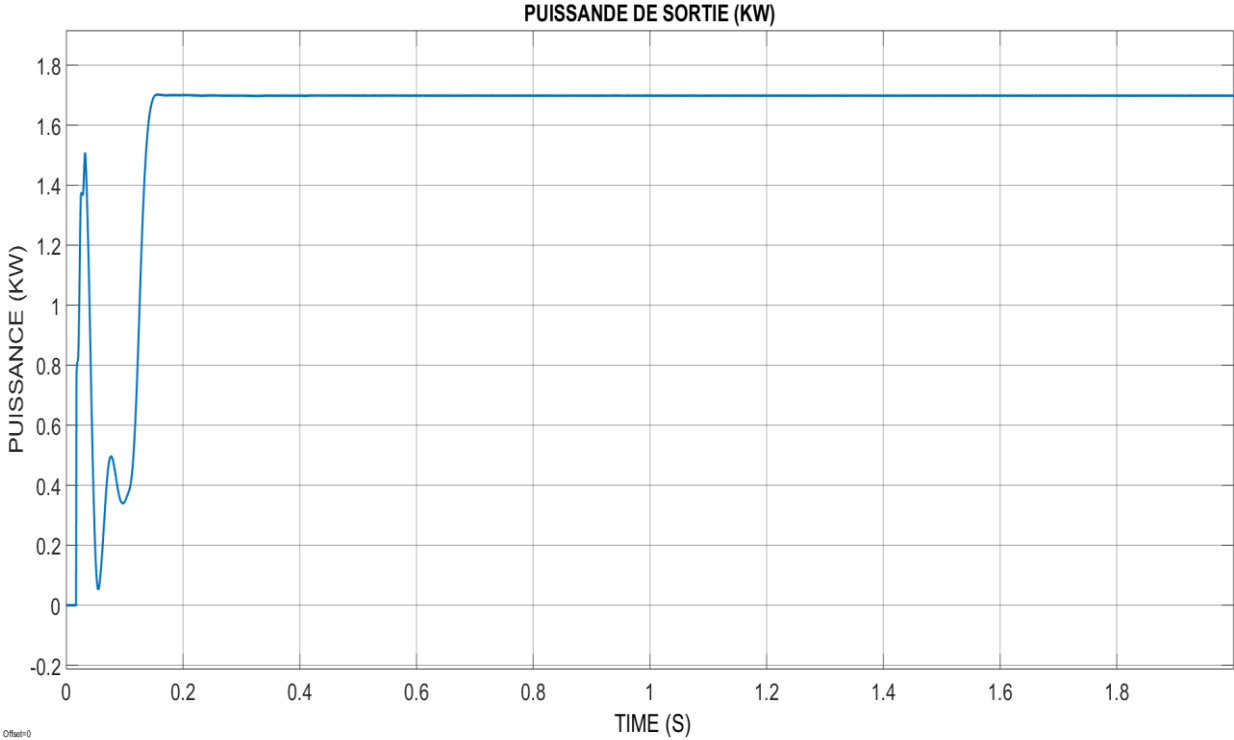
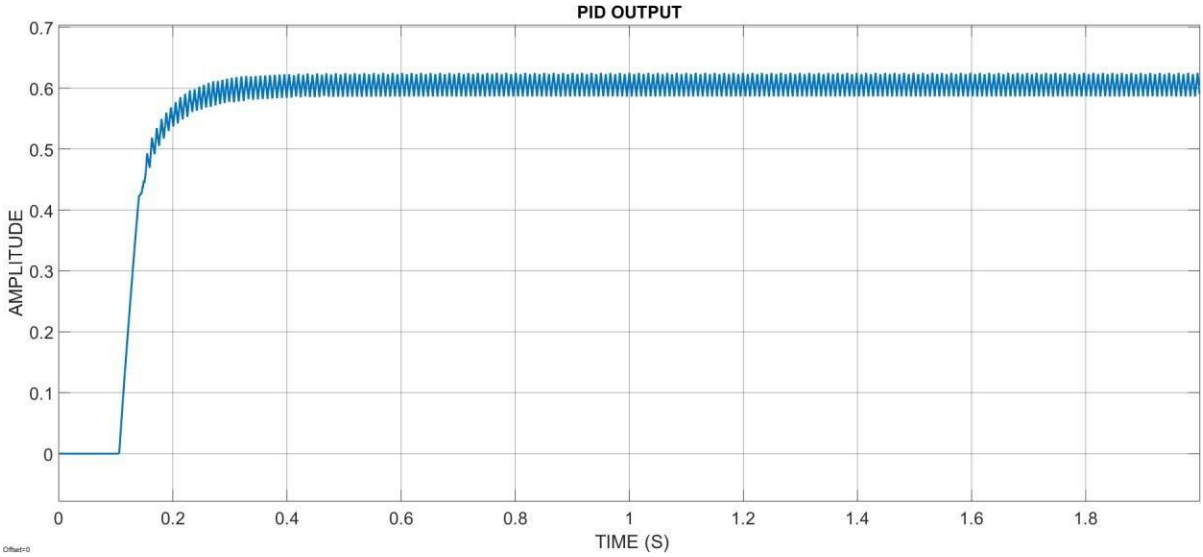


Figure 2.36 : Réponse tension sortie (VPV) du système

**Chapitre 2 : Modélisation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT**



*Figure 2.37 : Réponse Puissance de sortie (PWM) du système*



*Figure 2.38 : Réponse de la sortie PID OUTPUT*

### 9 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de la description du convertisseur DC/DC qui est un convertisseur de puissance (DC/DC de type Boost) commandé par un algorithme MPPT.

Dans la première partie de ce chapitre, Nous avons présenté le principe de la connexion directe entre le générateur photovoltaïque et la charge. Ensuite, nous avons étudié le fonctionnement d'un convertisseur de type Boost qui est employés très souvent. La commande de ces convertisseurs s'effectue par une variation du rapport cyclique du signal de commande de l'interrupteur qui est déduit de l'algorithme du MPPT.

La deuxième partie, est consacrée à l'explication de principe de recherche du MPP après l'étude des différentes algorithmes MPPT utilisés dans notre travail, la méthode de perturbation et observation, l'algorithme P&O amélioré par logique floue, et enfin l'algorithme MPPT basé sur la logique floue, nous nous sommes particulièrement intéressés par l'algorithme basé sur la logique floue qui est un algorithme robuste et efficace. Cependant, l'implémentation de ces types d'algorithme est l'objectif de chapitre prochain.

### **CHAPITRE 3 : IMPLEMENTATION FPGA**

---

#### **1 Introduction :**

Les progrès technologiques dans le domaine des circuits intégrés ont permis la réduction des coûts et de la consommation. Les circuits intégrés spécifiques ont permis une réduction de la taille des systèmes numériques ainsi que la réalisation de circuits de plus en plus complexes, tout en améliorant leurs performances et leur fiabilité. Aujourd'hui les techniques de traitement numérique occupent une place majeure dans tous les systèmes électroniques modernes grand public, professionnels ou militaires. De plus, les techniques de réalisation de circuits spécifiques, tant dans les aspects matériels (composants reprogrammables, circuits caractérisés et bibliothèques de fonctions), que dans les aspects logiciels (placement-routage, synthèse logique) font désormais de la microélectronique une des bases indispensables pour la réalisation de systèmes numériques performants. Elle impose néanmoins une méthodologie de développement très structurée. Les circuits reprogrammables les plus efficaces sont sans aucun doute les circuits FPGA (Field Programmable Gate Array). Ce sont des circuits programmables entièrement qui peuvent implanter physiquement n'importe quelle fonction logique. En outre, ils ne sont pas limités à traiter les informations séquentiellement comme les microprocesseurs ; en cas d'erreur, ils peuvent être reprogrammés électriquement sans avoir à retirer le composant de leur environnement. Dans ce chapitre ; on va présenter et expliquer l'implémentation sur FPGA de la commande neuro-floue en utilisant le langage VHDL.

Ce chapitre présente et explique la mise en œuvre de la commande logique floue sur FPGA en utilisant le langage VHDL. Notre travail est composé de différentes parties (blocs) qui sont ensuite combinées pour créer le circuit complet.

#### **2 Langage de description VHDL :**

Auparavant pour décrire le fonctionnement d'un circuit électronique programmable, les techniciens et les ingénieurs utilisaient des langages de bas niveau (ABEL, PALASM, ORCAD/PLD.) ou plus simplement un outil de saisie de schéma. Actuellement la densité de fonctions logiques (portes et bascules) intégrées dans les PLD (Programmable Logic Device) est telle (plusieurs milliers voire millions de portes) qu'il n'est plus possible d'utiliser les outils d'hier pour développer les circuits d'aujourd'hui.

### **Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA**

Les sociétés de développement et les ingénieurs ont voulu s'affranchir des contraintes technologiques des circuits. Ils ont donc créé des langages dits de haut niveau à savoir VHDL et VERILOG. Ces deux langages font abstraction des contraintes technologiques des circuits PLD. Ils permettent au code écrit d'être portable, c'est-à-dire qu'une description écrite pour un circuit peut être facilement utilisée pour un autre circuit.

Il faut avoir à l'esprit que ces langages dits de haut niveau permettent de matérialiser les structures électroniques d'un circuit. En effet les instructions écrites dans ces langages se traduisent par une configuration logique de portes et de bascules qui est intégrée à l'intérieur des circuits PLD. C'est pour cela qu'on préfère parler de description VHDL ou VERILOG que de langage. Dans ce qui suit, on s'intéressera uniquement au VHDL et aux fonctionnalités de base de celui-ci lors des phases de conception ou synthèse.

Abbréviation **VHDL** signifie VHSIC (Very High-Speed Integrated Circuit) (Hardware Description Language). Ce langage a été développé dans les années 80 par le DoD (Department of Defense) des Etats-Unis ; l'objectif était de disposer d'un langage commun avec les fournisseurs pour décrire les circuits complexes. En 1987, une première version du langage est standardisée par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sous la dénomination IEEE Std. 1076-1987 (VHDL 87). Une évolution du VHDL est normalisée en 1993 (IEEE Std. 1076-1993 ou VHDL-93) ; cette nouvelle version supprime quelques ambiguïtés de la version 87, et surtout met à disposition de nouvelles commandes. Actuellement, tous les outils dignes de ce nom supportent le VHDL-93. En 1997, de nouvelles librairies ont été normalisées de manière à ajouter des fonctions pour la synthèse (conception) de circuits logiques programmables PLD, et plus particulièrement les FPGA. La dernière révision est celle de 2002 (IEEE Std. 1076-2002 ou VHDL-2002).

#### **2.1 Relation entre une description VHDL et un circuit FPGA :**

L'implantation d'une ou de plusieurs descriptions VHDL dans un circuit FPGA va dépendre de l'affectation que l'on fera des broches d'entrées/sorties et des structures de base du circuit logique programmable.

La figure 3.1 représente un exemple de descriptions VHDL ou de blocs fonctionnels implantés dans un FPGA. Lors de la phase de synthèse chaque bloc sera matérialisé par des portes et/ou des bascules. La phase suivante sera d'implanter les portes et les bascules à l'intérieur du circuit FPGA. Cette tâche est réalisée par le logiciel placement/routage (Fitter), au cours de laquelle les entrées et sorties seront affectées à des numéros de broches. En effet dans la description fonctionnelle d'un FPGA. On a souvent besoin d'une fonction qui sert à cadencer le fonctionnement de l'ensemble, celle-ci est très souvent réalisée par une machine

## Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

d'états synchronisée par une horloge.

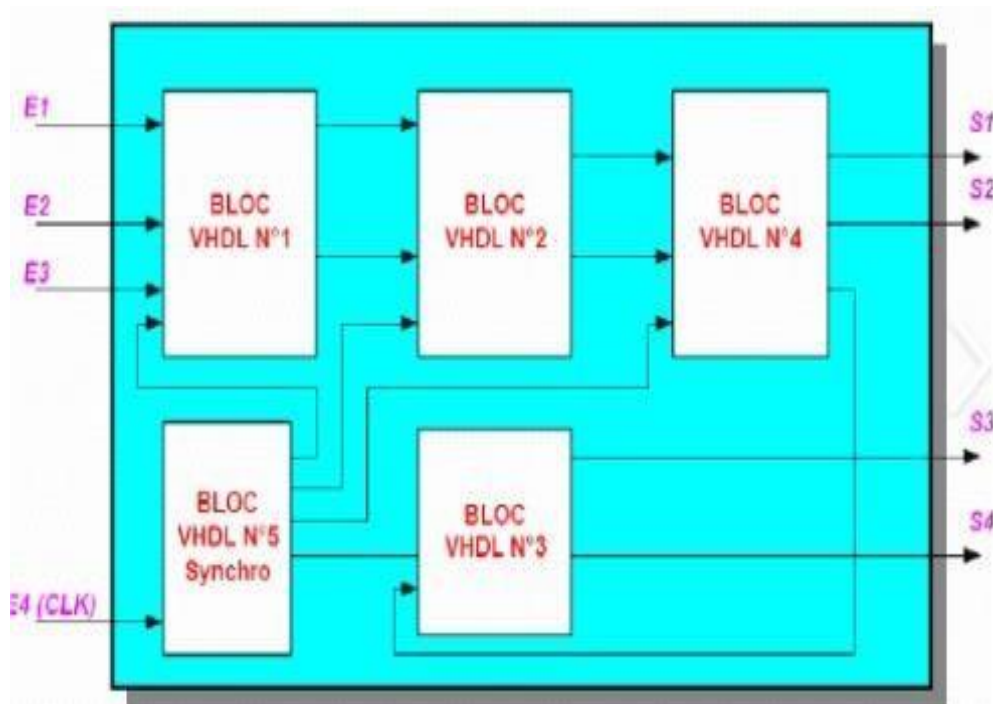


Figure 3.1 : Schéma fonctionnel d'implantation d'une description VHDL dans un circuit FPGA [11]

### 2.2 Saisie du texte VHDL :

La saisie du texte VHDL se fait sur le logiciel « ISE Xilinx Project Navigator », propose une palette d'outils permettant d'effectuer toutes les étapes nécessaires au développement d'un projet sur circuit FPGA. Il possède également des outils permettant de mettre au point une entrée schématique ou de créer des diagrammes d'état, qui peuvent être utilisés comme entrée au lieu du texte VHDL.

#### 2.1.1 Explications et Simulations des constituants du contrôleur logique flou :

Le problème est divisé en quatre parties :

1. Un bloc (1) qui calcul la variation du rapport cyclique dD en fonction des deux entrées E, dE.
2. Un bloc (2) qui sert à générer le signal de sortie en ayant la valeur du rapport cyclique son entrée.
3. Un bloc (3) qui calcul les deux entrées E et dE du contrôleur logique flou (logique-flou) en fonction des deux entrées I (courant à la sortie de panneau) et V (tension aux bornes du panneau)
4. On a fait un petit programme (4) de test qui contient un vecteur des valeurs du courant et de la tension qu'on va injecter à l'entrée du contrôleur successivement pour s'assurer d'avoir un signal modulé à la sortie.

## Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

- Autre test qui montre la poursuite de MPP est fait. Nous allons présenter les premières quatre parties dans la liste suivante :

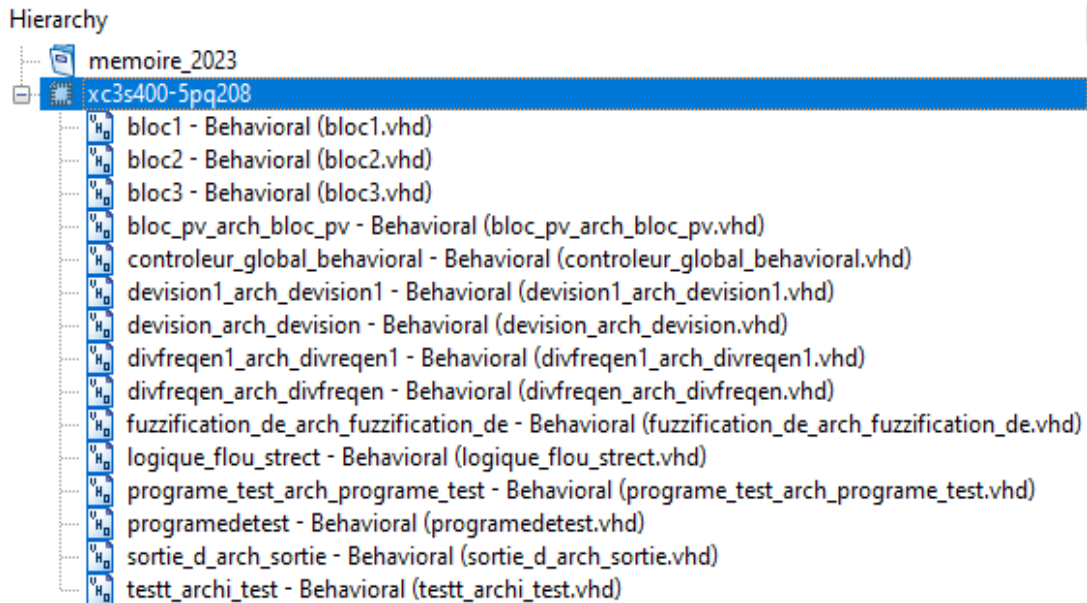


Figure 3.2 : Montre comment se présente le logiciel (ISE Xilinx Project Navigator).

### 1. Bloc (1) :

Le cœur du contrôleur est représenté par le bloc 1 qui est composé de 05 sous blocs, comme indiqué dans la figure 3.3.

- Bloc pour la fuzzification de l'entrée dE.
- Un autre pour la fuzzification de l'entrée E.
- Un troisième pour l'application des règles d'inférences (ici dans le modèle ANFIS la T-norme est le produit naturel)
- Les deux autres blocs ont pour rollier, de la normalisation et la défuzzification.
- Simulation de bloc (1) globale.

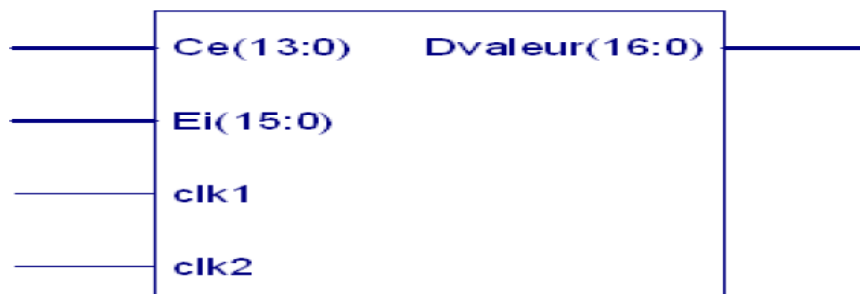


Figure 3.3 : Représenté le Bloc (1)

Ce bloc a 04 entrées et 01 sorties :

- Ce** : à 14 bits (mot signé) reçoit la valeur de dE. Puisque les nombres réels ne sont pas synthétisables, on peut travailler qu'avec des nombres entiers, on les a multipliées par 1000 afin d'augmenter la précision cette entrée varie dans l'intervalle

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

[-5000,5000].

- **E<sub>i</sub>** : avec 16 bits (mot signé) reçoit la valeur de E multipliée par 1000 cette entrée varie dans l'intervalle [-32000,10000].
  - Une entrée d'horloge (clk1) pour prendre des nouvelles valeurs de E et dE à chaque front montant.
  - Une deuxième entrée d'horloge (clk2) très rapide par rapport à la première utilisée pour faire des calculs de division dans le cinquième sous-bloc.

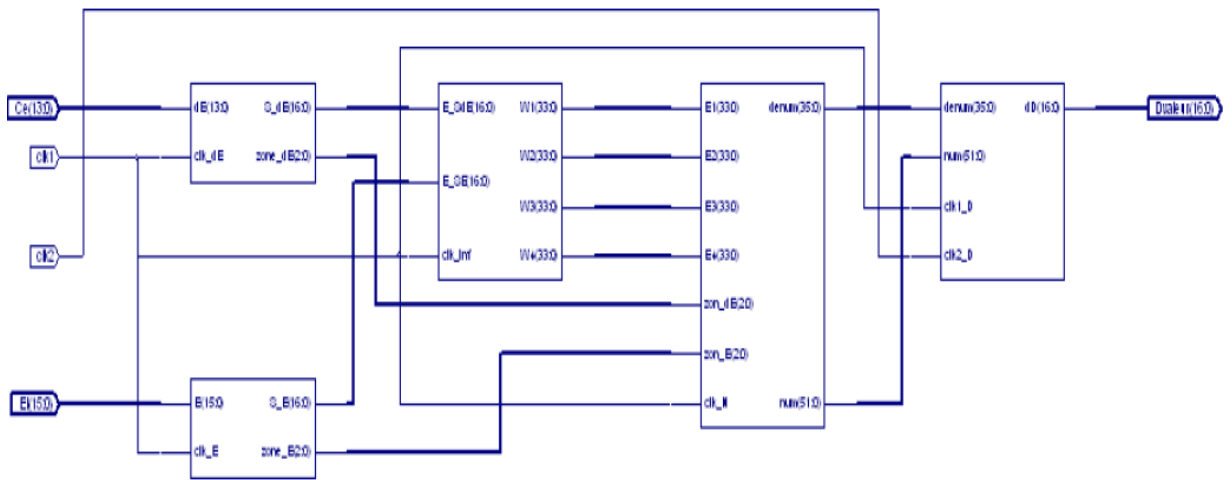


Figure 3.4 : circuit global des constitutions du bloc (1)

#### A. Le bloc de fuzzification de l'entrée dE :

Un mot non signé de 17 bits est utilisé pour représenter la sortie de ce bloc (S\_dE), qui est multipliée par 105, et son intervalle de variation est de [0, 100000]. Pour simplifier les calculs, la sortie Zone\_dE indique la position de la valeur dE dans son univers de discours car il n'y aura que deux entrées dE qui donnent une valeur non nulle pour cette entrée, et comme l'une des deux entrées peut être calculée en fonction de l'autre, il n'y aura qu'une seule sortie au lieu de six.

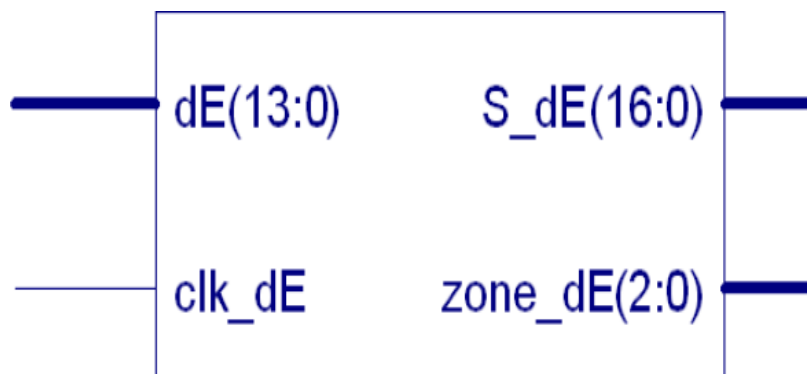


Figure 3.5 : Bloc de fuzzification de l'entrée dE

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

On réalise maintenant une simulation en comparant les résultats de ce bloc avec ceux du calcul précis.

Tableau 3.3 : Résultats donnés par ce bloc avec celles de calcul exact.

La valeur de dE	La valeur de fuzzification utilisant le programme VHDL.	La valeur de fuzzification exacte.
0.958	1	1
3.970	0.44625	0.44420
-1.710	0.11712	0.11485

On remarque bien que les résultats donnés par la simulation sont très proches des valeurs exactes.

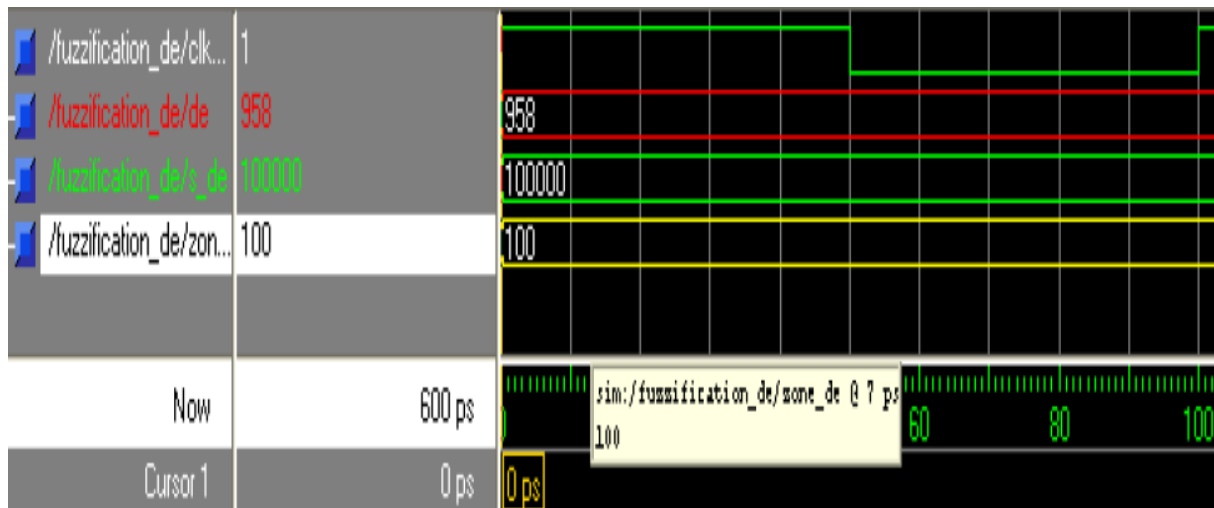


Figure 3.6: Simulation du bloc de fuzzification de l'entrée dE en prenant la valeur 0.958

#### B. Bloc de fuzzification de l'entrée E :

L'explication de ce bloc est comme le précédent.

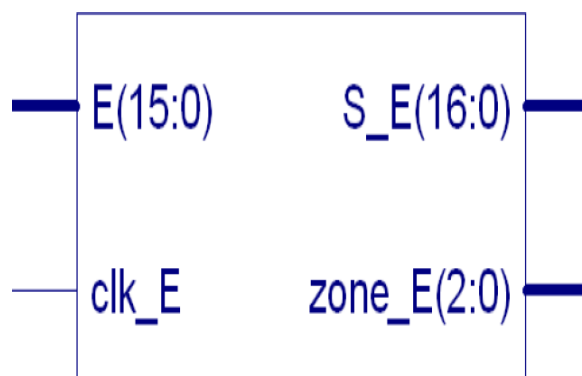


Figure 3.7 : Bloc de fuzzification de l'entrée E

Tableau 3.4 : Valeurs des données par la simulation

La valeur de E	La valeur de défuzzification utilisant le programme VHDL.	La valeur de défuzzification exacte.
-2.673	0.62536	0.59777
-5.220	1.00000	1.00000

- Les valeurs réelles sont très similaires aux résultats de la simulation.

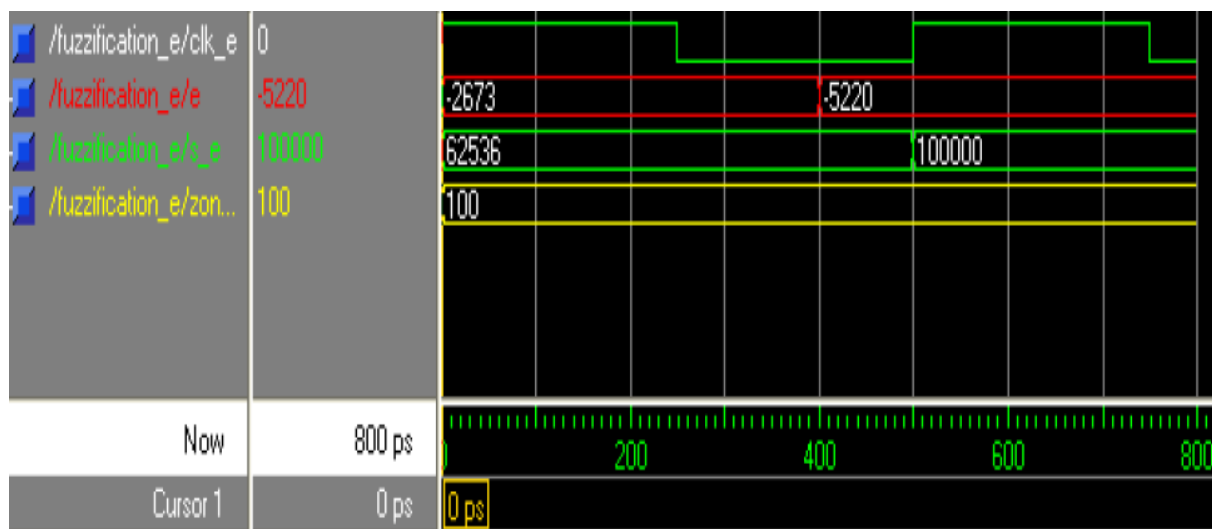


Figure 3.8 : Simulation du bloc de fuzzification de l'entrée E en prenant les deux valeurs (-2.673 et -5.220).

C. Bloc des inférences :



Figure 3.9 : Bloc d'inférences

Ce bloc sert à calculer les quatre produits :

$$W1 = E_{SdE} * E_{SE} \quad (3.1)$$

$$W2 = E_{SE} * (100000 - E_{SdE}) \quad (3.2)$$

$$W3 = (100000 - E_{SE}) * E_{SdE} \quad (3.3)$$

$$W4 = (100000 - E_{SdE}) * (100000 - E_{SE}) \quad (3.4)$$

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

A partir des deux entrées  $E_{SdE}$  et  $E_{SE}$  qui sont au préalable multiplié par  $10^5$ , les quatre valeurs sont donc multipliées par  $10^{10}$ .

- Simulation du bloc d'inférences en prenant :

$$E_{SE} = 62300 (0.623 * 10^5)$$

$$E_{SdE} = 44562 (0.44562 * 10^5)$$

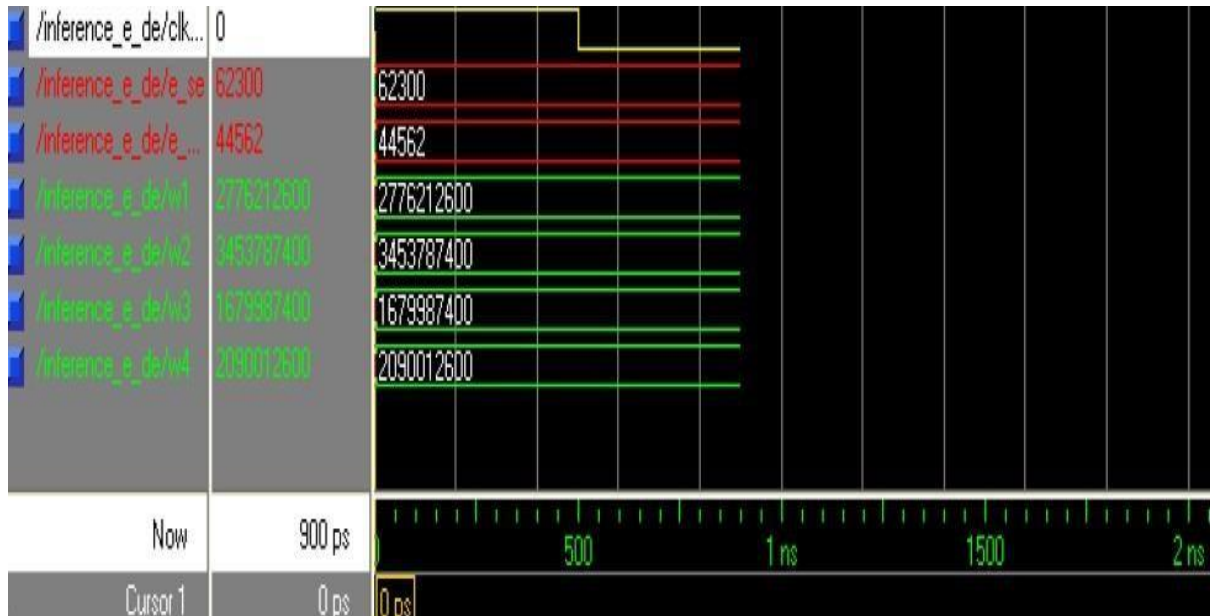


Figure 3.10 : Simulation du bloc

#### D. La normalisation et la défuzzification :

Après avoir calculé les quatre valeurs (au lieu de 36, car les autres sont nulles), la relation suivante est utilisée pour calculer la sortie finale :

$$dD = \frac{W1d1}{\sum_{i=1}^{36} Wi} + \frac{W2d2}{\sum_{i=1}^{36} Wi} + \dots + \frac{W36d36}{\sum_{i=1}^{36} Wi} \quad (3.5)$$

Le calcul des termes  $\frac{W}{\sum_{i=1}^{36} W}$  est l'étape de normalisation, et la sommation de tous ces termes

La défuzzification, qui est multipliée par les  $d_j$ , nécessite le calcul des deux expressions pour éviter de faire de nombreuses divisions. Figure (3.11)

$$Num = W1d1 + W2d2 \dots \dots + W36d3 \quad (3.6)$$

$$Denum = \sum_{i=1}^{36} Wi \quad (3.7)$$

Dans notre cas :  $W1d1, W2d2, W3d3, W4d4$  Tel que  $d1, d2, d3, d4$  sont choisis parmi les 36 valeurs données en sachant les deux zones des deux entrées E et dE.

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

Et  $Denum = W1 + W2 + W3 + W4$ .

Ensuite on fait la division

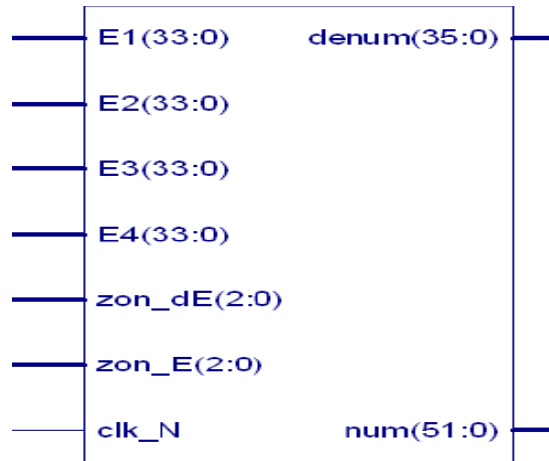


Figure 3.11: Bloc qui calcule le Num et le Denum .

Voici une petite simulation du bloc :

Prenant :

- $E = -2.673$  (la valeur de  $E * 1000$  en binaire est : 1111010110001111)
- $dE = -0.154$  (la valeur de  $dE * 1000$  en binaire est : 11111101100110)

On aura :

$$W1 = E1 = 3939205176. W2 = E2 = 2314394824. W3 = E3 = 2359894824. W4 = E4 \\ = 1386505176.$$

Et  $Zone_{dE} = 100, Zone_E = 011$ .

Avec ces deux zones :

$$d1 * 10^5 = 1729, d2 * 10^5 = 1544, d3 * 10^5 = -523, d4 * 10^5 = -1370$$

Alors :  $Num = 7250574273488$  et  $Denum = 10000000000$

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

Le calcul exact est bien confirmé par les deux figures suivantes :

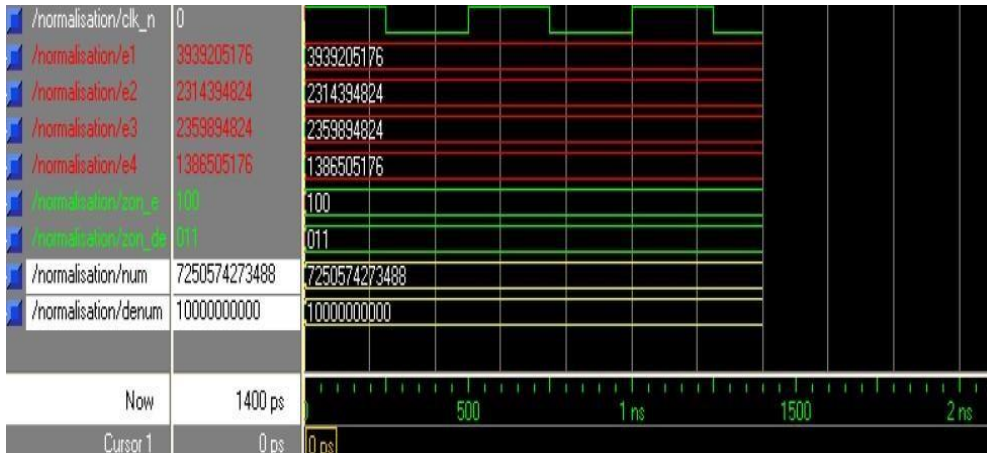


Figure 3.12 : Réponse de simulation Format décimal



Figure 3.13 : Réponse de simulation Format binaire

En fin ; la division sera faite par le bloc de la figure (3.14). À la sortie du bloc précédent on aura la valeur de  $Num$  multipliée par  $10^{10}$  par rapport à sa valeur réelle, aussi, la valeur de  $Denum$  sera multipliée par  $10^5$  par rapport à sa valeur réelle, cette la multiplication de  $Num$  par  $10^{10}$   $Denum$  est multipliée par  $10^5$ . Nous aiderons à faire la division avec la précision voulue. Cette divisionniste faite par soustractions successives en utilisant une horloge très rapide ( $clk2\_D$ ) par rapport à celle qui est utilisée pour la synchronisation ( $clk1\_D$ ) ; le résultat final sera bien sûr multiplié par  $10^5$ .

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

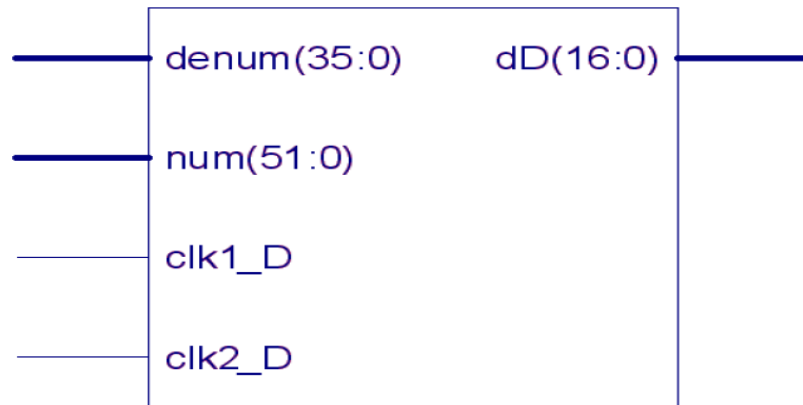


Figure 3.14 : Le bloc qui calcule la valeur de  $dD$  multipliée par  $10^5$

Prenant :

On aura :  $dD = 0.00725 * 10^5$ .

Ce résultat est confirmé par la simulation suivante :

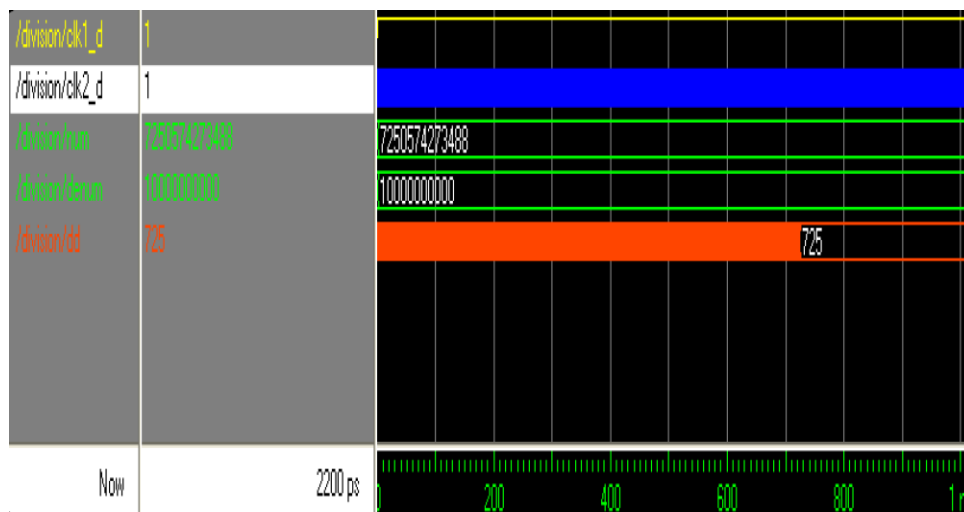


Figure 3.15 : Simulation du bloc de division

**E. Simulation globale du Bloc (1) :**

Dans cette section on va comparer les résultats donnés par le programme VHDL avec ceux de MATLAB, figure (3.16).

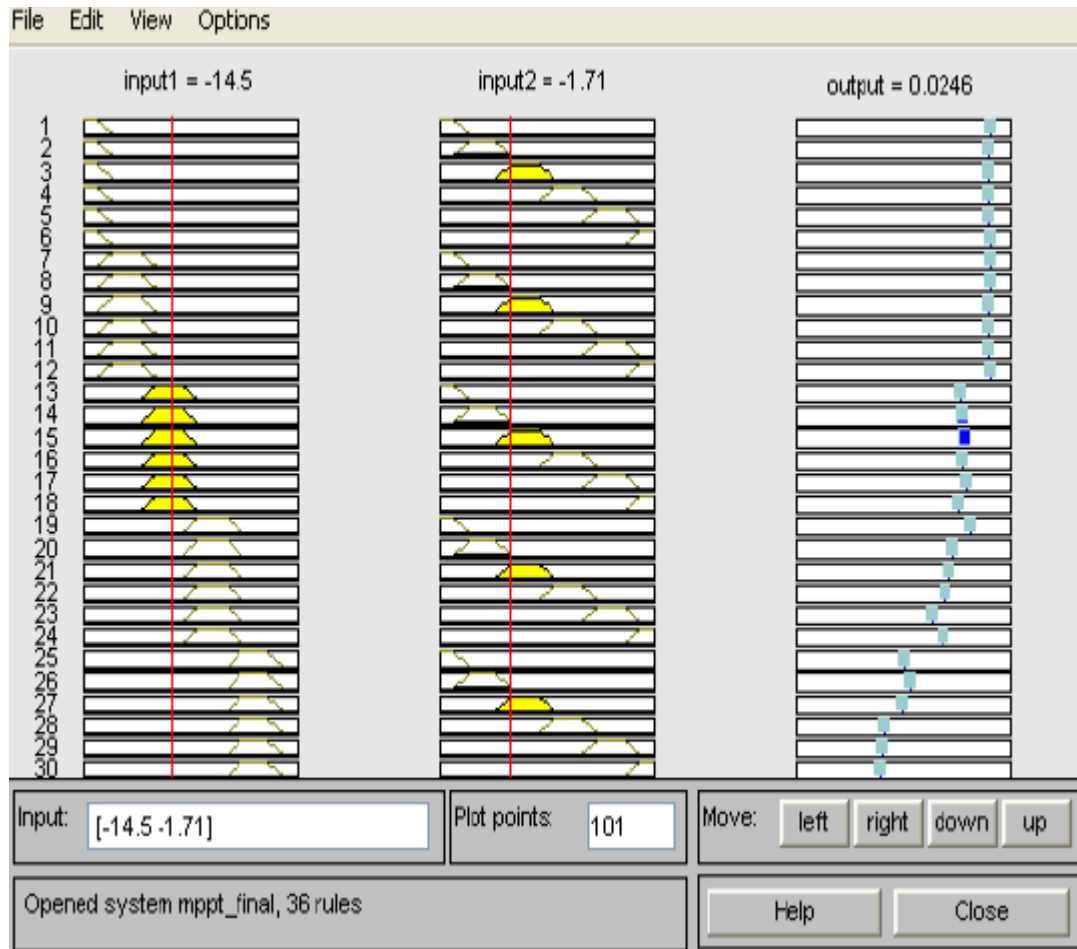
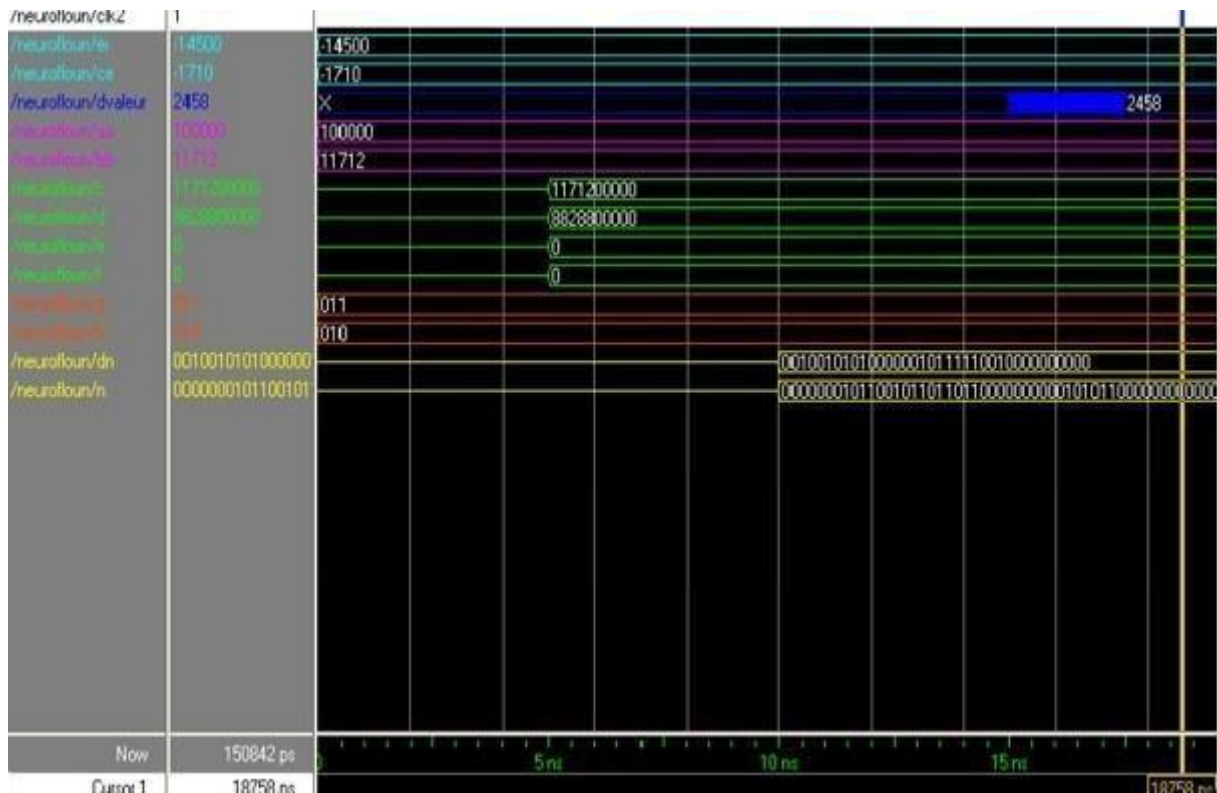


Figure 3.16 : Boite de visualisation des règles sous MATLAB

Tableau 3.5 : Présente quelques comparaisons

	<b>dD avec VHDL</b>	<b>dD avec MATLAB</b>
<b>E=-2.673</b> <b>dE=-0.1549</b>	0.00725	0.00674
<b>E=-5.960</b> <b>dE=0.958</b>	0.01729	0.01540
<b>E=-8.300</b> <b>dE=3.97</b>	0.01193	0.01200
<b>E=-14.5</b> <b>dE=-1.71</b>	0.02458	0.02460

On remarque La dernière essaie ( $E = -14.5$  et  $dE = -1.71$ ) est présentée avec les deux approches

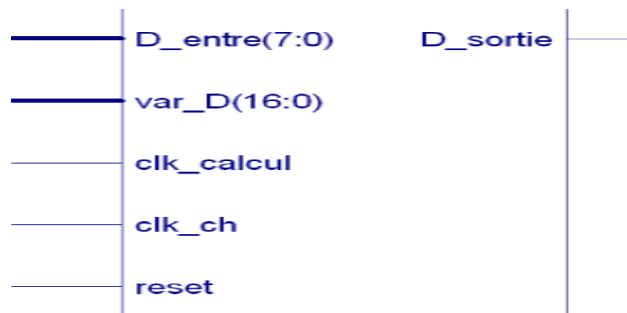


*Figure 3.17 : Simulation de fonctionnement global du bloc (1)*

La simulation ci-dessus montre clairement que le résultat des nouvelles entrées ne sera visible qu'après quatre périodes. Par conséquent, lorsqu'il s'agit d'acquérir de nouvelles valeurs E et dE, cette remarque doit être prise en compte.

## 2. Bloc (2) :

Ce bloc figure 3.18 ajoute la valeur  $dD$  produite par le bloc (1) à la valeur de D actuelle et génère un signal carré modulé en largeur, voir figure 3.3 ; si l'entrée reset est au niveau 1, la valeur de D est toujours égale à  $D_{entre}$ .



*Figure 3.18 : Bloc (2)*

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

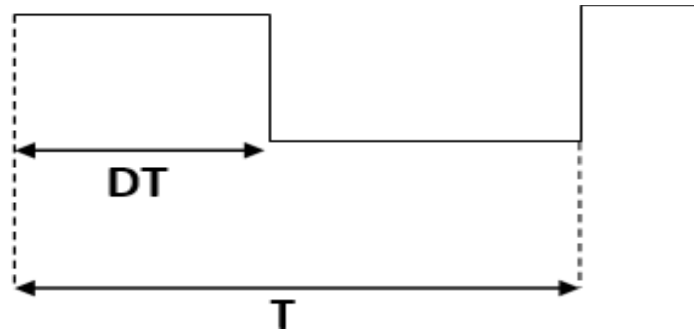


Figure 3.19 : Format de signal généré par le bloc 2

Une simulation est faite pour ce bloc figure 3.18 : initialement on prend  $D = 0.5$  avec un changement  $dD = 0.08191$  et on met reset à '1' on remarque que la valeur de  $D$  ne change pas tant que reset = '1' ; lorsque reset devient '0' on voit bien qu'après chaque front montant de  $clk\_ch$  la valeur de  $D$  augmente de 0.08191.

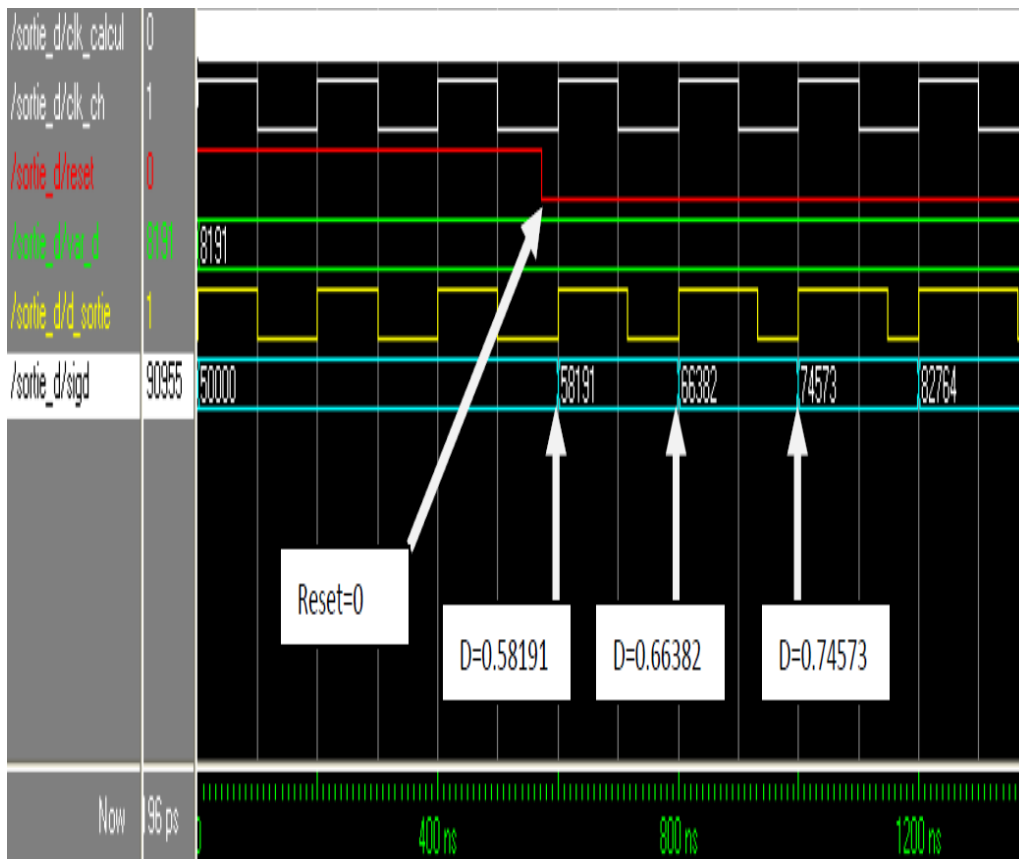


Figure 3.20 : Simulation de bloc (2)

## Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

### 3. Bloc (3) :

Ce bloc est divisé en deux parties :

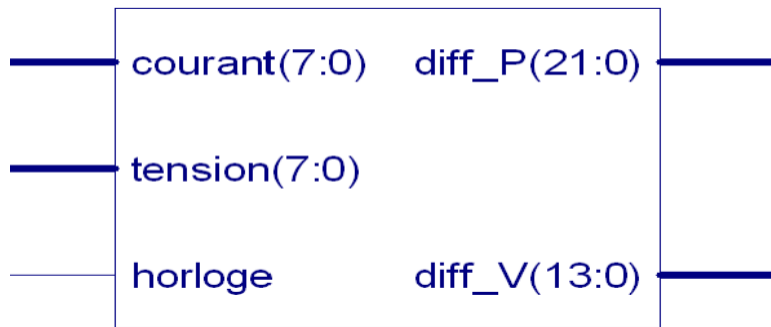


Figure 3.21 : Représenté 1ère tranche de bloc (3)



Figure 3.22 : Représenté 2em tranche de bloc (3)

La figure 3.22 sert à calculer  $E$  et  $dE$ .

Les deux entrées « courant » et « tension » sont deux mots de 8bits, la valeur maximale correspond à la valeur maximale du courant ou de la tension mesurée.

Voici une simulation pour tester le bon fonctionnement de ces deux blocs, On prend quatre couples (courant(A), tension(V)) :

$$P1 = 124w, P2 = 132w, P3 = 133.4, P4 = 134.4.$$

$$(dP1 = 8w, dV1 = 4v), (dP2 = 1.4w, dV2 = 2v), (dP3 = 1w, dV3 = 2v)$$

La simulation présentée à la figure 3.23 montre que notre programme donne les mêmes résultats trouvés par le calcul exact. La même chose pour la figure 3.24 avec les valeurs de  $E_i$  et  $dE_i$ .

$$dE1 = E1 - 0 = E1 = 2 ; dE2 = E2 - E1 = -1.3 ; dE3 = E3 - E2 = -0.2$$

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

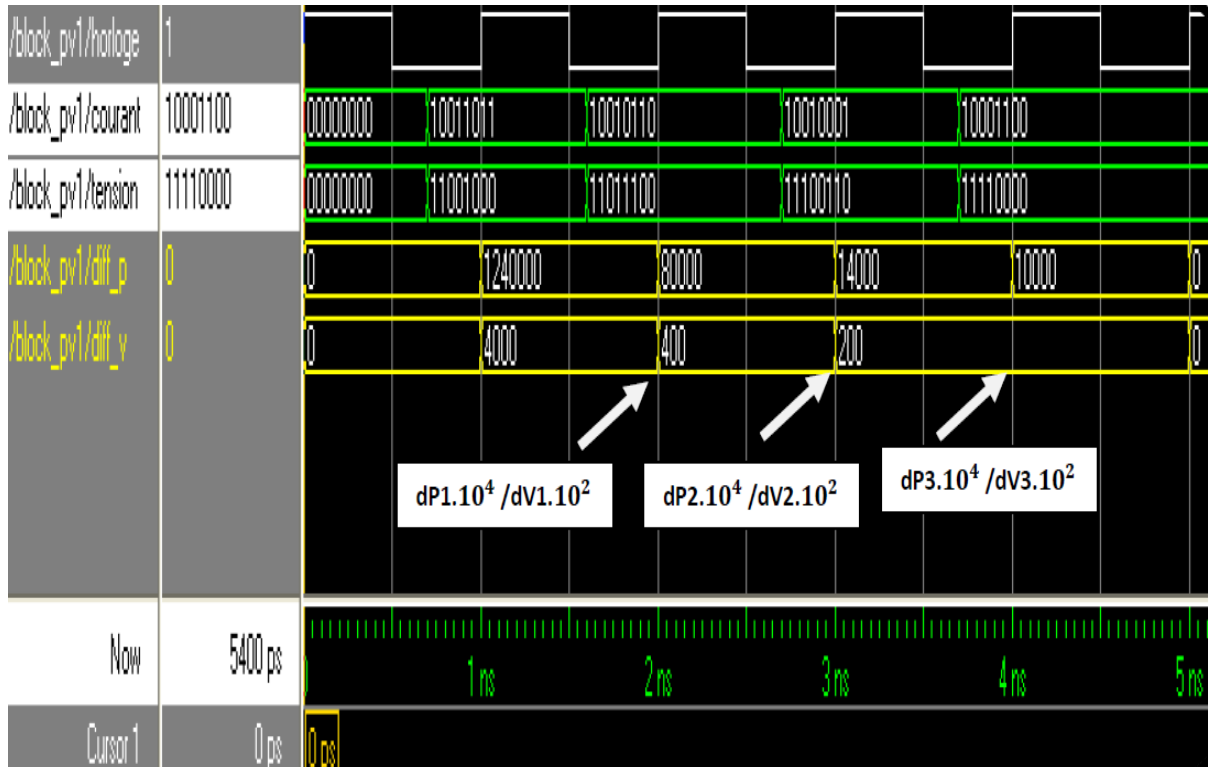


Figure 3.23 : Simulation de la première partie du bloc (3)

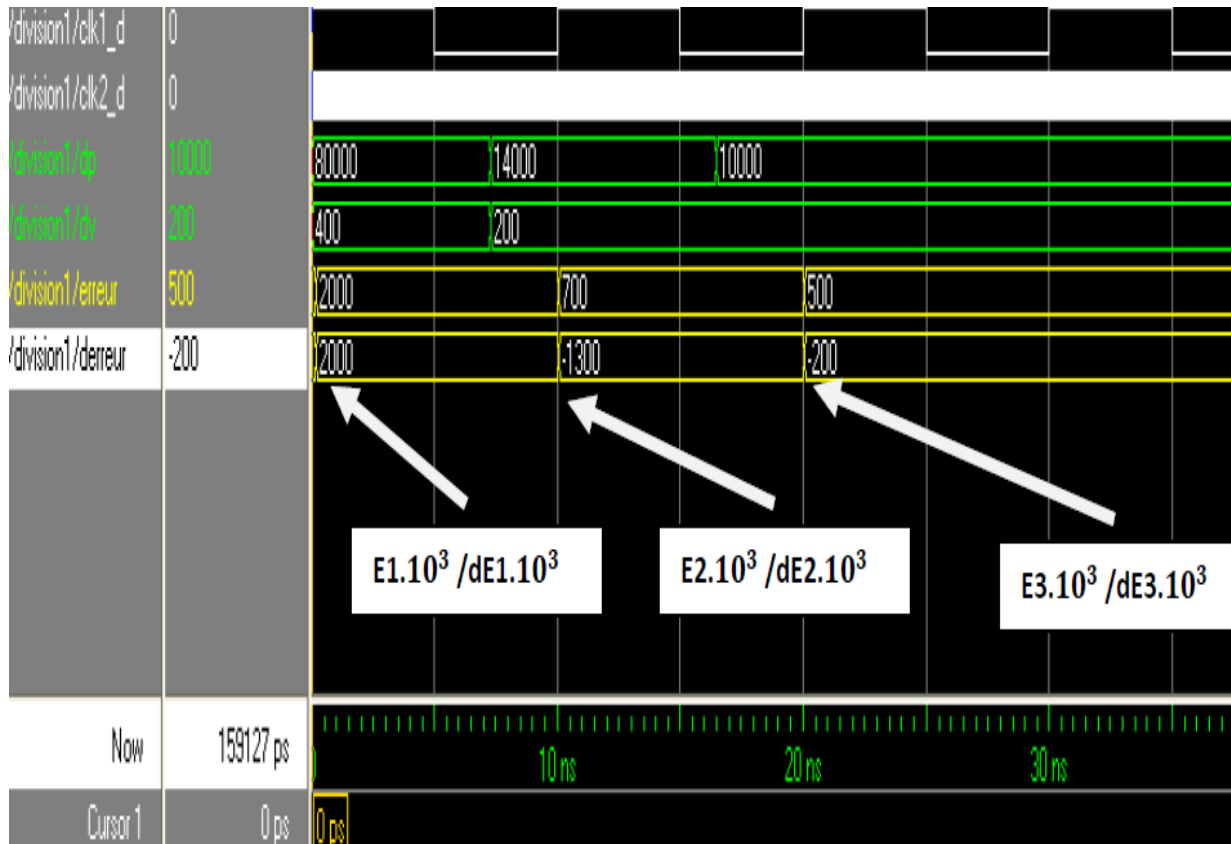


Figure 3.24 : Simulation de la deuxième partie du bloc (3)

## Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

### 4. L'Assemblage des trois blocs (1), (2), (3) :

En utilisant les trois blocs présentés précédemment, un calcul E et dE à partir de I et V ; le second est une architecture logique floue qui sert à calculer dD en ayant E et dE à son entrée ; et le troisième génère le signal modulé pour la commande de le hacheur.



Figure 3.25 : Contrôleur global

*Dstart* : Valeur initiale du rapport cyclique.

*I* : Entrée de la valeur de courant mesurée.

*V* : Entrée de la valeur de tension mesurée.

*Clk* : Horloge du système : on a utilisé une horloge avec une fréquence de 24MHz.

*Rst* : Initialisation du système en travaillant

Avec la valeur *Dstart.SigD* : c'est le signal de commande généré par le contrôleur.

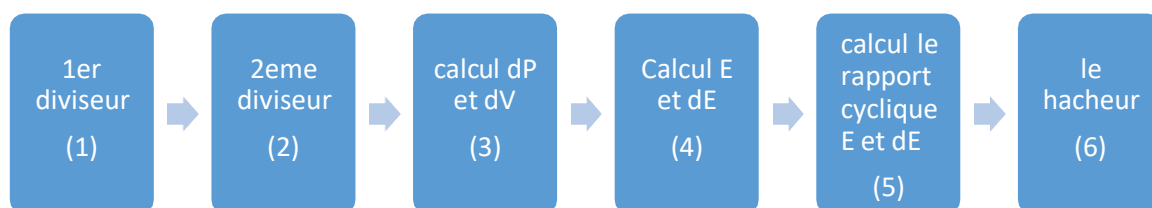


Figure 3.26 : Schéma des constitutions du contrôleur global

Explication des six parties de la figure (3.26) :

(1) Représente un premier diviseur de fréquence qui divise la fréquence du système par  $10^4$ .

(2) Représente un deuxième diviseur de fréquence qui divise la fréquence du signal sortant de la partie 1 par 10.

(3) Il sert à calculer *dP* et *dV* à partir de *I*, *V* ; il est synchronisé par un signal de 1000Hz.

### Chapitre 3 : IMPLEMENTATION FPGA

- (4) Son rôle est le calcul de  $E$  et  $dE$  ; il est synchronisé par un signal de fréquence 10kHz, cette fréquence est suffisamment grande ( $10 \times 1\text{kHz}$ ) pour pouvoir faire tous les calculs pour avoir une nouvelle valeur de  $D$  correspondant aux valeurs actuelles de  $I$  et  $V$ .
- (5) Cette partie calcule la valeur du rapport cyclique nécessaire en fonction de  $E$  et  $dE$ , il est synchronisé par un signal de 10 kHz, comme pour le bloc précédent
- (6) . Ce dernier bloc génère le signal de commande du hacheur avec une fréquence de 1000Hz.

#### 5. Simulation de la poursuite du MPP par le contrôleur logique flou :

Afin de tester notre programme, nous avons écrit un programme de simulation en réalisant une boucle fermée entre le couple (tension, courant) et le rapport cyclique  $D$ , explicitement, chaque couple  $(i, v)$  nous donne un  $D$ , et le  $D$  nous donnera de nouvelles valeurs de  $(i, v)$  et ainsi de suite ; les résultats de cette simulation sont sur la figure suivante :

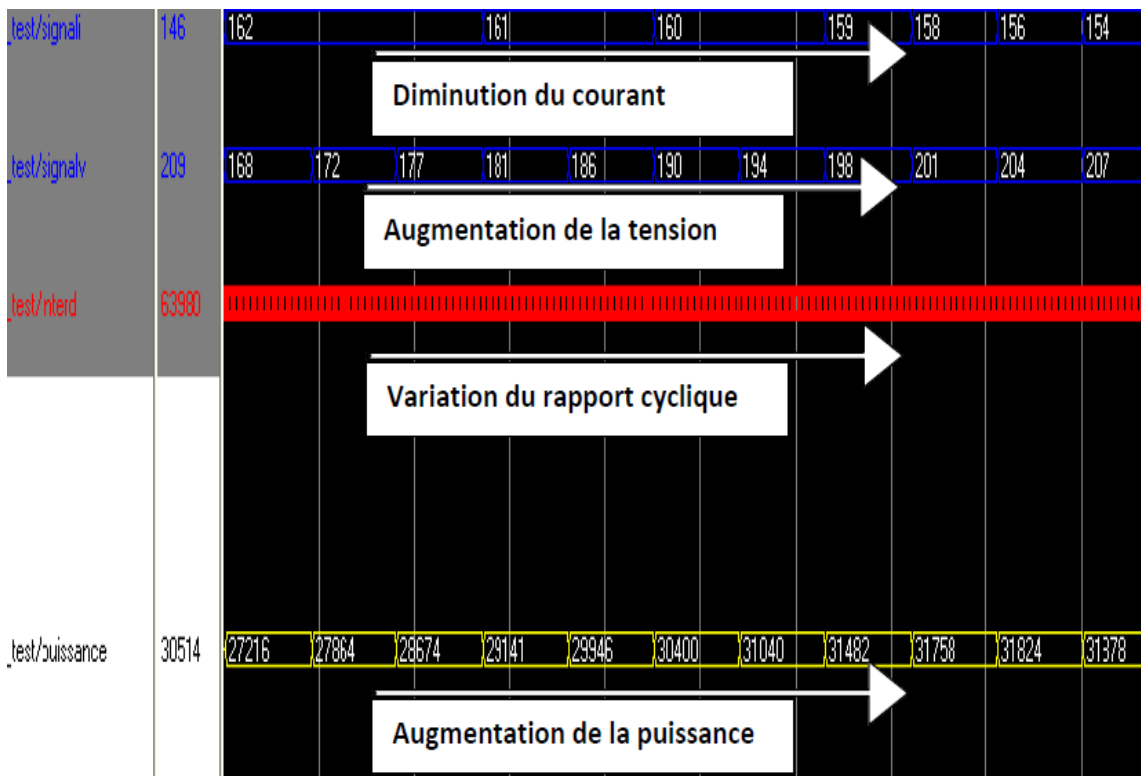


Figure 3.27 : Simulation de la poursuite de la MPP par le réseau logique flou

### 3 Conclusion:

Tous les exemples qui ont été fait dans cette partie en tant que simulation sont juste pour tester le bon fonctionnement des programmes, sinon, une validation plus poussée doit se faire avec des modules photovoltaïques et pour cela il reste un peu de travail pour faire l'étage de conversion analogique-numérique des tensions et courants prélevés du générateur photovoltaïque et à ce moment-là le test sera beaucoup plus efficace.

Notre PFE constituera peut-être une aide pour les étudiants qui s'intéressent à l'énergie solaire en utilisant la commande logique-floue et veulent aller jusqu'à l'aboutissement du projet et avoir des résultats concrets.

#### **4 Conclusion générale :**

L'étude approfondie des cellules photovoltaïques (PV) présentent de grandes variances de leur puissance électrique en fonction des conditions météorologiques. De plus, quand elles sont connectées à une charge, certains problèmes apparaissent, et la puissance transférée à la charge correspond rarement à la puissance maximale délivrée par le générateur PV. Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation associé à un algorithme MPPT bien approprié. Dans la présente étude, nous avons utilisé deux algorithmes MPPT, l'algorithme "Perturber and Observe" (P&O) puis expliquer l'implémentation sur FPGA de la commande logique-floue en utilisant le langage VHDL. Les résultats de simulation ont illustré les Points de Puissance Maximale PPM sur les caractéristiques puissance-tension pour différentes valeurs de l'ensoleillement. Nous pouvons aussi, conclure que le convertisseur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV et la technique MPPT utilisant l'algorithme " Perturber and Observe" arrive à joindre rapidement le PPM avec des oscillations insignifiantes.

## REFERENCES

- [1]: Z. Salameh and D. Taylor: Maximum Power Point "Tracker for Photovoltaic Arrays," Solar Energy, V01.44, No.1, pp.57-61(1990).
- [2]: H. Chung, and S. Y. Hui, "A Novel Maximum Power Point Tracker for PV Panels Using Switching Frequency Modulation", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 17, NO. 6, NOVEMBER 2002.
- [3]: A. Masoum and M.Sarvi, "Design, simulation and construction of a new fuzzy-based maximum power point tracker for photovoltaic applications" et " A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays using Fuzzy Controller", Proceedings of the IEEE Power Elec. Specialist Temp Conference, pp.396-403, 1994.
- [4]: W.Xiao, "A Modi. Ed Adaptative Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems", The University of British Columbia, 2003.
- [5] : H. MOURAD, « Mise en œuvre d'une méthodologie pour l'étude de rayonnement parasite basse fréquence de panneaux solaires sur des capteurs situés en zone proche », Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [6] : P. Valentin, t. Clement, v. Noemie, « les panneaux solaires », mémoire scientifique, Polytech (paris-sud), 2009.
- [7]: Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [8] : M. BOUKLI Hacen omar, thèse de magister, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique »
- [9]: Akihiro Oi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", Faculty of California Polytechnic State University, 2005.
- [10] : Oudia mohamed, boutiche ahmed « étude d'un système photovoltaïque connecté aux réseau local, mémoire d'ingénieur, USTHB 2007.
- [11] : B. M. Bernadette, « Logique Floue Principes Aide à la Décision » 2023.
- [12] : Academia.edu, « Présentation de La Logique Floue ».2023.
- [13]: Ohnishi, S. Takata: "Comparisons of Maximum Power Tracking Strategy of Solar Cell Output and Control Characteristics Using Step Up/Down Chopper Circuit", Trans. IEEJ, 112-D, 3, 250/257(1992)