

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de projet de fin d'étude

présenté par

BENSMAIL WAFA

&

ABDALLAH FATMAZOHRA

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique
Option : Systèmes de Vision et Robotique

Etude et simulation de la commande MPPT basée sur l'approche Hill-Climbing Flou

Promoteur : Mr.R.BRADAI

Co-Promoteur : Mr. R.BOUKENOUI

Année Universitaire 2015-2016

Je dédie ce mémoire à mes parents MOHAMEDE et KHEDIDJA pour l'éducation qu'ils ont su me donner et qui m'a permis avec l'aide de DIEU d'arriver là où je suis. Je dédie ce mémoire à mes frères CHERIFE, RIDHA, RAFIK, FOUAD, MOUNIRE et ma sœur SABIHA et ma grand-mère et mon oncle MOHAMEDE et à toutes ma famille.

À tous mes camarades de promotion et à mes valeureux enseignants enfin à tous mes amis.

ABDALLAH F.Z

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents
à tous les membres de ma famille
et à tous mes amis*

WAFA

Remerciements

Nous adressons toute notre gratitude à ALLAH tout puissant, qui nous a donné la force, le courage et la patience d'accomplir toutes ces années d'études.

Nos sincères remerciements s'adressent à notre Promoteur Mr R.BRADAI et à notre Co-promoteur Mr R.BOUKENAOUI pour l'aide et les conseils éclairés qui ils nous a offert tout au long de ce travail.

Nous remercions par la même occasion, les membres du jury de nous avoir fait honneur en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude à nos amis collègues, frères et sœurs qui ont été présents tout au long de notre parcours.

A toutes les personnes ayant, de près ou de loin participé à l'aboutissement de ce travail.

ملخص: استغلال الطاقات المتجددة يعرف تطورات هامة بحيث توجه هذه الدراسة في تحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية بواسطة الصفيحة الكهروضوئية، بحيث هذه الأخيرة يكون انتاجها أقصى، وبهدف الحصول على أحسن مردود لنظم الطاقات المتجددة، لابد من تتبع نقطة الاستطاعة العظمى PPM، لمصدر الطاقة. لهذا فإننا سنقوم في هذا العمل بمقارنة ثلاث طرق مختلفة لتتبع نقطة الاستطاعة القصوى MPPT (طريقة "التشويش والملاحظة (P&O)"، طريقة "تسلق المرتفع (Hill Climbing)" وطريقة "المنطق الغامض (La Logique Floue)". محتوى هذا العمل الذي تم على مساحة MATLAB/SIMULINK يمثل جميع الخطوات المتبعة لتنفيذ محاكات هذه الطرق ويبين مميزاتها ومدى فعاليتها.

كلمات المفاتيح: تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (PPM)، لغة البرمجة (MATLAB/SIMULINK)، MPPT، الصفيحة الكهروضوئية، التشويش والملاحظة (P&O)، تسلق المرتفع (Hill Climbing)، المنطق الغامض (La Logique Floue).

Résumé : L'exploitation des énergies renouvelable a connue de considérables développements cette dernière décennie. Nous nous intéressons dans cette étude à la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique (photovoltaïque). Nous désirons au moyen d'un module PV obtenir un rendement maximal. Afin de maximiser les performances des systèmes d'énergie solaire il est nécessaire de poursuivre le PPM de la source d'entrée. Dans ce travail nous allons faire une comparaison entre trois algorithmes de la commande MPPT (P&O, Hill Climbing et La Logique Floue), ce travail renferme les étapes pour la simulation de ces commandes, et montre ces caractéristique et ces performances, ce travail a été effectué dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Mots clés : Photovoltaïque ; PV ; PPM ; espace de travail : MATLAB/SIMULINK ; P&O ; Hill Climbing ; La Logique Floue.

Abstract: The exploitation of renewable energies knows considerable developments this last decade. We are interested in this study in the electromagnetic solar energy transformation into electric power (photovoltaic). We want to achieve maximum performance through a Photovoltaic Module. We will make in this work a comparison between three MPPT methods (P&O, Hill Climbing and Fuzzy Logic), and this work will represent all steps taken to simulate these commands, and shows their performance. This work was performed in the environment MATLAB/SIMULINK,

Keywords: photovoltaic; MPP; Workspace: MATLAB/SIMULINK; MPPT; P&O; Hill Climbing; Fuzzy Logic.

Listes des acronymes et abréviations

Cd-Te	Tellurure de cadmium
CIS	Di-sélénium de cuivre indium
CIGS	Séléniure de cuivre, indium et gallium
λ	Longueur d'onde de la lumière
C	Conductance
c	Vitesse de la lumière
AM	Constante solaire (Air Mass)
h	Constant de Planck (6.62.10-34 J.S)
E_{ph}	Quantité d'énergie d'un photon (eV)
I_{ph}	Le photo-courant (A)
I_{pv}	Courant du module ou panneau PV (A)
I_{sat}	Le courant de saturation (A)
R_s	La résistance série
R_p	La résistance shunt
q	La charge de l'électron
PV	Photovoltaïque
PPM	Point de puissance maximale
n	Le facteur d'idéalité de la jonction.
MPP	Maximum power point
MPPT	Poursuite du point de puissance maximale (maximum power point tracking)
P&O	Perturbation et Observation
HC	Hill Climbing
GPV	Générateur photovoltaïque
I	Courant d'un générateur PV (A)
V	Tension à la sortie d'un module solaire (V)
V_{co}	Tension en circuit ouvert d'un module solaire (V)

V_{ppm}	Tension au point de puissance maximale (V)
n_s	Nombre de cellules en série.
n_p	Nombre de cellules en parallèle.
V_{pv}	La tension aux bornes de cette même cellule
V_{opt}	Tension Optimale d'un générateur ou d'une cellule PV (V)
I_{pv}	Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur
I_{cc}	Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire (A)
I_{ppm}	Intensité maximale
I_{opt}	Courant Optimal d'un générateur ou d'une cellule PV (A)
n	Facteur d'idéalité de la diode
K	La constante de Boltzmann
T	Température absolue en K ($T(K)=273+T(^{\circ}C)$)
S_m	La surface du module
P_{max}	La puissance maximale
E	L'éclairement (W/m^2)
η	Le rendement
FF	Facteur de Forme (Fill Factor)
W_c	Watt crête
STC	Conditions standards de test (Standard Test Conditions)
DC-DC	Conversion continu-continu.
D	Rapport cyclique
P_{pv}	Puissance du panneau Photovoltaïque
$P(D)$	La puissance en fonction du rapport cyclique
FS	La fréquence
$V_{out}=V_o$	Tension à la sortie du convertisseur
$V_{in}=V_i$	Tension à l'entrée du convertisseur
L	L'inductance

ΔD	Variation du rapport cyclique.
I_L	Courant de la bobine
CCM	Le mode de conduction continue
P_{out}	La puissance de sortie
P_{in}	La puissance d'entrée
I_{out}	Courant à la sortie du convertisseur
I_{Lmoy}	Courant moyen de la bobine
I_{in}	Courant à l'entrée du convertisseur
V_L	Tension de la bobine
R_L	La charge
ΔI_L	Variation du courant de l'inducteur
ξ	L'énergie stockée dans l'inductance
I_D	Courant dans la Diode
R_{DS}	La résistance de commutation
I_S	Courant dans le switch
C_{out}	Le condensateur de sortie
I_{Cin}	Courant dans le condensateur d'entrée
I_{Cout}	Courant dans le condensateur de sortie
C_{in}	Le condensateur d'entrée
R_{IN}	L'impédance d'entrée
S	Switch
G	L'ensoleillement

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Les Systèmes Photovoltaïque	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Effet photovoltaïque	4
1.3 Cellule photovoltaïque	4
1.3.1 Technologies des cellules PV	5
1.3.2 Rendements des différentes technologies.....	6
1.3.3 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	8
1.4 Module photovoltaïque.....	9
1.4.1 Association de Cellules Photovoltaïques en Série.....	9
1.4.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle	10
1.4.3 Paramètres d'un module PV.....	10
1.4.4 Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque	12
1.4.5 Influence de l'irradiation sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension.....	13
1.4.6 Influence de la température sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension.....	14
1.5 Avantages spécifiques du photovoltaïque	14
1.6 Conclusion	15
Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT	16
2.1 Introduction.....	16
2.2 Méthode de poursuite de puissance maximale	17
2.2.1 Introduction à la commande MPPT.....	18
2.2.2 Commande MPPT	18
2.2.3 Techniques de commande MPPT	19
2.3 Étage d'adaptation	25
2.3.1 Hacheur Abaisseur (Buck).....	26
2.3.2 Hacheur éleveurs-abaisseurs (Buck-Boost).....	27
2.3.3 Hacheur éleveurs (Boost).....	28
2.4 Conclusion	38
Chapitre 3 La Logique Floue	39
3.1 Introduction.....	39
3.2 Logique floue	40
3.2.1 La théorie des sous-ensembles floue	40
3.2.2 Variable linguistique	41

3.2.3	Fonctions d'appartenance.....	41
3.2.4	Opérations sur les sous-ensembles flous et normes.....	42
3.2.5	Propositions floues.....	43
3.2.6	Raisonnement en logique floue	43
3.2.7	Implication floue.....	44
3.2.8	Inférence.....	44
3.2.9	Méthode de Takagi-Sugeno.....	46
3.3	Commande à logique floue	47
3.3.1	Configuration générale d'un régulateur flou	48
3.3.2	Fuzzification.....	49
3.3.3	Inférences.....	50
3.3.4	Défuzzification	53
3.4	MPPT à base de logique floue	55
3.5	Conclusion	56
Chapitre 4	Modélisation et Simulation	57
4.1	Introduction.....	57
4.2	Module solaire PV	58
4.3	Connexion directe « GPV-Charge »	60
4.4	Connexion Indirect « GPV-Convertisseur-Charge »	61
4.4.1	Calcul des composants	63
4.5	Poursuite du PPM.....	65
4.5.1	Simulation du système solaire avec l'algorithme P&O	66
4.5.2	Simulation de l'algorithme Hill Climbing	67
4.5.3	Simulation de l'algorithme HC basée sur la Logique Floue	68
4.6	Conclusion	73
	Conclusion générale	74
	Bibliographie.....	76

Liste des figures

Figure 1.1. Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium (présence d'une jonction PN)	5
Figure 1.2. Différents technologie des cellules.	6
Figure 1.3. Schéma équivalent électrique de la cellule PV.	8
Figure 1.4. Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.	9
Figure 1.5. Caractéristique résultante d'un groupement constitué de np cellules identiques en parallèle.	10
Figure 1.6. Facteur de forme pour une cellule PV.....	12
Figure 1.7. Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque.....	12
Figure 1.8. L'influence de l'irradiation sur les courbes caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$	13
Figure 1.9. Influence de la température sur les courbes caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	14
Figure 2.1. Schéma bloc d'un algorithme de recherche du PPM.....	17
Figure 2.2. Principe de la première technique MPPT numérique.	19
Figure 2.3. Recherche du PPM par la méthode (P&O).	20
Figure 2.4. Algorithme type de la méthode P&O.	21
Figure 2.5. Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation.	22
Figure 2.6. Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.....	23
Figure 2.7. Algorithme type de la commande Hill Climbing.	24
Figure 2.8. Schéma de principe de la commande Hill Climbing.	25
Figure 2.9. Forme du signal de commande du commutateur S.	26
Figure 2.10.circuit électrique de base du hacheur dévolteur.	27
Figure 2.11.circuit électrique de base du convertisseur Buck-Boost.	27
Figure 2.12. Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "boost".....	28
Figure 2.13. Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps DT.	29
Figure 2.14. Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1 - D) T$	30
Figure 2.15. Variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps.	31
Figure 2.16. Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T	33
Figure 2.17. Allures de la tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T.	34
Figure 2.18. Allures des tensions d'entrée et au bornes de la bobine pendant une période de conduction T.....	36
Figure 2.19. Courant circulant dans le condensateur d'entrée C.	37
Figure 2.20. Impédance d'entrée de l'ensemble convertisseur + charge résistive.	37
Figure 3.1. Représentation graphique des termes linguistiques.	41
Figure 3.2. Formes usuelles des fonctions d'appartenance.	42

Figure 3.3. Exemple de la méthode d'inférence Max-min.....	46
Figure 3.4. Exemple de la méthode de Takagi-Sugeno.....	47
Figure 3.5. Organisation fonctionnelle d'un régulateur flou.	48
Figure 3.6. Forme de fonctions d'appartenances pour l'erreur normalisée.....	50
Figure 3.7. Trajectoire dans le plan de phase.	51
Figure 3.8. Cas de deux règles contradictoire.	53
Figure 3.9. Cas de règles malles formulées.	53
Figure 3.10. Défuzzification par la méthode des hauteurs pondérées.	55
Figure 3.11. Défuzzification par méthode de la moenne des maximums.	55
Figure 3.12. Schéma de l'algorithmme classique MPPT floue.	56
Figure 4.1. Circuit equivalent du module PV KD210GH-2PU.	59
Figure 4.2. Bloc des caractéristiques du module PV KD210GH-2PU.	59
Figure 4.3. Système solaire simple.	60
Figure 4.4. Les caractéristiques du PV connecté directement à une charge.	61
Figure 4.5. GPV avec un convertisseur DC/DC et une charge.	62
Figure 4.6. Modélisation d'un convertisseur DC/DC dans Matlab/Simulink.	62
Figure 4.7. Les caractéristiques du PV connecté à un convertisseur DC/DC et une charge.	63
Figure 4.8. Modélisation du GPV avec une commande MPPT et un convertisseur DC/DC	65
Figure 4.9. Modélisation de l'algorithmme P&O dans Matlab/Simulink.	66
Figure 4.10. Puissance Ppv(T) atteinte avec la commande P&O.....	66
Figure 4.11. Modélisation de l'algorithmme Hill Climbing.....	67
Figure 4.12. Puissance Ppv(T) obtenu avec l'algorithmme Hill Climbing	68
Figure 4.13. Modélisation du Fuzzy "Hill Climbing" dans Matlab/Simulink.....	69
Figure 4.14. Modélisation de l'algorithmme Hill Climbing basée sur la logique Floue	69
Figure 4.15. Bloc « FUZZY Logic Designer ».....	70
Figure 4.16. Établissement du signal d'entrée ΔP	70
Figure 4.17. Signal d'entrée ΔI	71
Figure 4.18. Signal d'entrée ΔD	71
Figure 4.19. Bloc « Rule Editor ».	71
Figure 4.20. Puissances obtenu par l'algorithmme P&O et L'algorithmme Hill Climbing basée sur la logique Floue avec [600W/m ² - 1000W/m ²].....	72

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques	6
Tableau 3.1. Zones homogènes principales dans la matrice de MacVicar-Whelan.....	52
Tableau 4.1. Caractéristiques électrique du panneau KYOCERA KD210GH.	58
Tableau 4.2. L'algorithme de règles floues	72

Introduction générale

L'énergie s'est imposée comme étant l'élément moteur de toute civilisation à travers les temps. De nos jours, elle constitue un défi d'une très grande importance, et qui se trouve positionnée non loin de la majorité des crises économiques, conflits politiques ou armés contemporains. Ces dernières années, plusieurs inquiétudes ont surgit concernant les sources d'énergie actuelles, il est surtout question de leur pérennité et leur impact sur l'environnement. Parallèlement à cela, un grand intérêt a été porté et dirigé vers des sources d'énergies nouvelles, et surtout renouvelables ; des sources inépuisables, propres et respectueuse de l'environnement telles que l'énergie photovoltaïque (PV), l'énergie éolienne, hydraulique, géothermique ou encore la biomasse. L'énergie photovoltaïque qui provient de la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique se présente comme étant la plus adaptée pour notre pays vu son étendu, sa position géographique et son gisement solaire. Ce dernier a été évalué à plusieurs TWh/an selon le centre allemand spatial (DLR) [1]. La surface du Sahara algérien à lui seul peut capturer suffisamment d'énergie solaire pour répondre à la totalité de la demande mondiale selon Mr. Kaveh Zahedi, Directeur adjoint de la Division de Technologie, Industrie et Economie (DTIE) du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) [2]. Cela peut justifier l'importance du défi soulevé par le gouvernement visant l'intégration des énergies renouvelables en fixant un objectif de 5% en 2017 et 40% en 2030 [3]. Cependant, l'énergie photovoltaïque (PV) demeure chère vu le cout d'investissement initial des installations PV. Pour assurer sa compétitivité vis-à-vis des sources d'énergie conventionnelles, multiples efforts sont fait pour arriver à une dualité entre le Wh PV et Wh conventionnel.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) [4], basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette

cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT). Concernant ce travail, nous nous sommes intéressés essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation du générateur photovoltaïque. En effet, par exemple dans le cas des engins mobiles alimentés par l'énergie photovoltaïque, l'alimentation doit être assurée au point maximal de la puissance (MPPT) quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairement). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), Hill Climbing et l'approche Floue.

D'autre part, la logique floue a reçu une attention particulière de la part d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique MPPT Floue.

Le mémoire présenté est organisé en quatre chapitres. Après une introduction générale, comme il est mentionné par la suite :

Le premier chapitre comprend une introduction générale sur les systèmes photovoltaïques tels que les cellules photovoltaïques, le panneau photovoltaïque.

Dans le second chapitre, on trouve des généralités sur les convertisseurs DC-DC et leurs modèle mathématique du le hacheur boost et présent les méthodes plus populaire de la commande MPPT.

Le troisième chapitre présente des généralités sur la logique floue.

En Quatrième chapitre, on simule avec Matlab/Simulink les méthodes MPPT (P&O), Hill Climbing et l'approche Floue à contre réaction de tension.

Chapitre 1 Les Systèmes Photovoltaïque

1.1 Introduction

Le rayonnement solaire représente une ressource d'énergie importante et renouvelable, elle est de loin la plus intéressante. C'est pourquoi durant les dernières décennies les chercheurs dans le domaine se sont intéressés à l'exploitation de cette énergie pour la mettre au profit de l'humanité.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, où pour la première fois l'énergie solaire fut transformée en énergie électrique. En 1880, l'américain Charles FRITTS mit au point les premières cellules solaires au sélénium [5]. Un siècle plus tard cette technologie fut développée dans les environs des années 50 grâce au domaine spatial qui a trouvé dans celle-ci le meilleur moyen d'assurer l'énergie requise pour de long séjour dans l'espace, puis elle a été encore plus développée et utilisée dans d'autres secteurs à partir des années 70.

Chaque cellule génère une petite quantité d'électricité. Assemblées en série et en parallèle, elles fournissent une tension et un courant électrique : on obtient ainsi des modules photovoltaïques qui sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et les sites isolés.

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, les cellules photovoltaïques ainsi que les modules photovoltaïques et leur fonctionnement.

1.2 Effet photovoltaïque

Le scientifique français, Antoine Becquerel a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Un élément essentiel dans la conversion photovoltaïque est l'énergie transmise par les photons. On définit un rayon de lumière solaire comme la superposition d'ondes électromagnétiques de fréquences différentes. C'est aussi un faisceau de photons dont l'énergie est liée à la longueur d'onde par la constante de PLANCK.

$$E_{ph} = h \times f \quad (1.1)$$

- E_{ph} : L'énergie de photon.
- h : constante de PLANCK $= (6.62 \times 10^{-34} \text{ J/s})$.
- f : la fréquence correspondant à la longueur d'onde λ .

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

- c : étant la vitesse de propagation de la lumière $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$.

1.3 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque (PV), aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs [6].

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable (varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé) entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La figure 1.1 donne la structure, ainsi que le principe de fonctionnement d'une cellule PV.

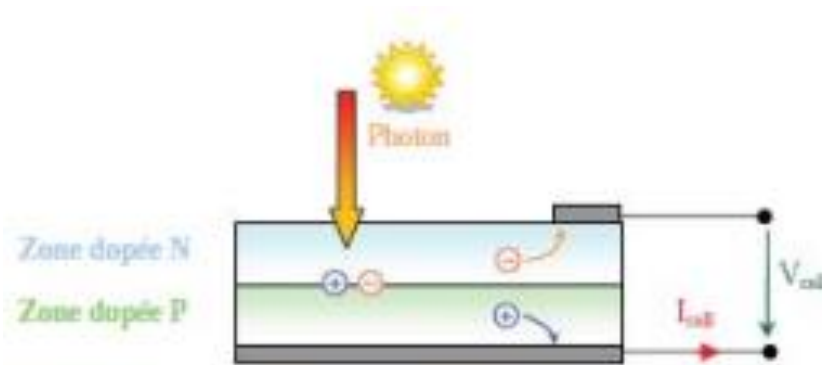


Figure 1.1. Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium (présence d'une jonction PN) [7].

1.3.1 Technologies des cellules PV

La structure et la composition des cellules PV constituent un élément très important dans leur rendement. En effet, les principales recherches se sont focalisées dans ce domaine.

Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses. On distingue en général les cellules cristallines et les cellules à couches minces.

a Cellules cristallines

Les cellules en silicium mono et poly-cristallin représentent environ 94% du marché. On distingue deux types des cellules :

La cellule monocristalline : qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches (Figure 1.2-a). Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 % [8].

Les cellules poly-cristallines : sont composées d'un agglomérat de cristaux (Figure 1.2-b). Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [8].

b Cellules à couches minces

La technologie des couches minces a l'avantage de produire les cellules par un procédé de revêtement à grande surface peu onéreux. Elles sont plus minces et peuvent même être déposées sur des supports flexibles (Figure 1.2-c). Par contre leur rendement est plus bas que celui des cellules cristallines. Divers matériaux semi-conducteurs entrent en ligne

de compte pour cette technologie : le silicium amorphe et micro-morphe, le Cd-Te (tellurure de cadmium), le CIS (séléniure de cuivre et d'indium), parfois aussi le CIGS (séléniure de cuivre, indium et gallium). Les nanotechnologies (cellules à colorants) ne jouent pas encore un grand rôle [9].

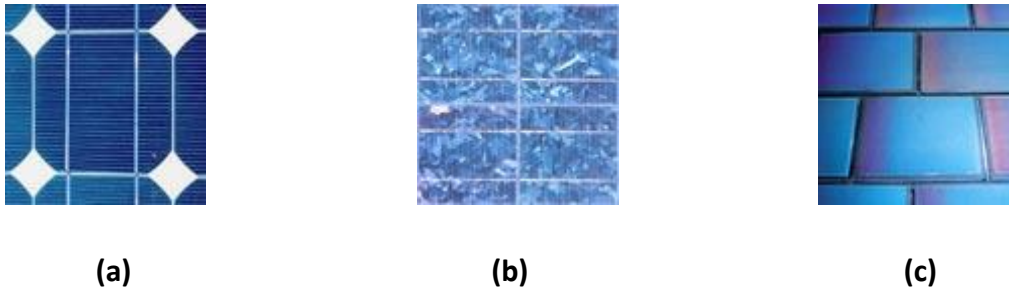


Figure 1.2. Différents technologie des cellules.

1.3.2 Rendements des différentes technologies

Le tableau suivant résume les rendements des différentes technologies qui existent actuellement ainsi que leurs domaines d'applications [10].

Chaque technologie est destinée à un domaine d'exploitation précis, on remarque par exemple que les silicium cristallin et amorphe sont beaucoup plus exploités au grand publique de même pour les cellules à base de CIGS ou de CdTe, tandis que la technologie GaAs est destinée au domaine spatial et les systèmes de concentration solaire.

Nous constatons aussi que le rendement des cellules photovoltaïques diminue réellement, comparé à la théorie ou aux résultats obtenues en laboratoire, ce qui explique l'influence des conditions météorologiques que nous allons aborder à la fin de ce chapitre.

Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	théorique	En laboratoire	disponibles	
Si mono (silicium monocristallin)	27,0 %	24,7 %	14,0-16,0 %	Modules de grandes Dimensions pour toits et façades, appareils

				de faibles puissances, espace (satellites)
Si poly (silicium polycristallin)	27,0 %	19,8 %	12,0-14,0 %	Modules de grandes Dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Si a (silicium amorphe)	25,0 %	13,0 %	6,0-8,0 %	Appareils de faible Puissance production d'énergie embarquée (calculatrice, montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
GaAs	29,0 %	27,5 %	18,0-20,0 %	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIGS (séléniure de cuivre, indium et gallium)	27,5 %	18,2 %	10,0-12,0 %	Appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
CdTe (tellurure de cadmium)	28,5 %	16,0 %	8,0 %	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

Tableau 1.1 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.

1.3.3 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure 1.3 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage.

Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule [11] :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

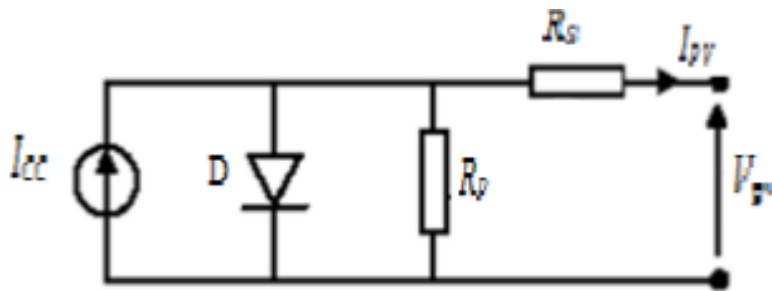


Figure 1.3. Schéma équivalent électrique de la cellule PV.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné

$$\text{par : } I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv} - R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \right) \quad (1.3)$$

Où I_{sat} est le courant de saturation dans la diode (A), K est la constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K), T est la température effective des cellules en Kelvin (K), q est la charge de l'électron ($q=1,6 \times 10^{-19}$ C), n est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$) ; I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule ou bien courant de (court-circuit) dépendant de l'éclairage et de la température, R_p est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [12].

1.4 Module photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque ou un module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montée en série ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristique désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert.

En effet, dans des conditions d'ensoleillement standard ($1000\text{W}/\text{m}^2$; 25°C ; $\text{AM}=1.5$), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 W c sous une tension de 0.5V . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles [13].

1.4.1 Association de Cellules Photovoltaïques en Série

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

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure 1.4. L'équation (1.4) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules [14].

$$I_{\text{scc}} = I_{\text{CC}} \text{ et } V_{\text{sco}} = n_s V_{\text{co}} \quad (1.4)$$

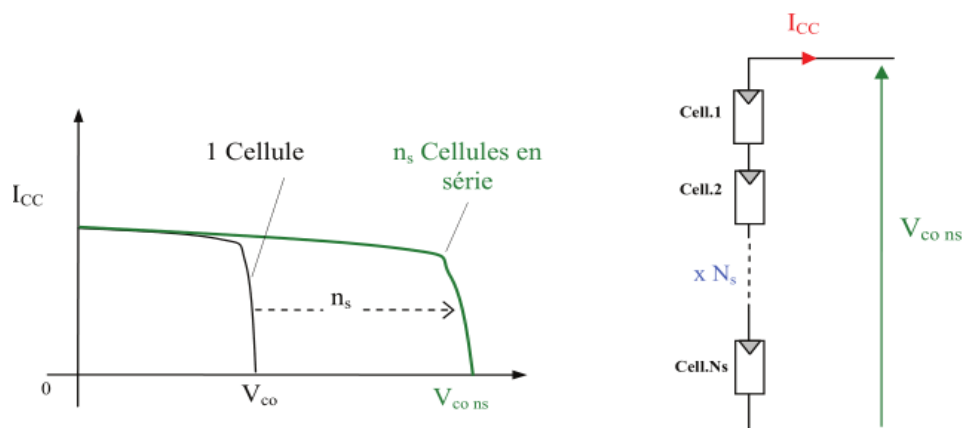


Figure 1.4. Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques [14].

1.4.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Une association parallèle de n_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure 1.5. L'équation (1.5) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules [14].

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co} \quad (1.5)$$

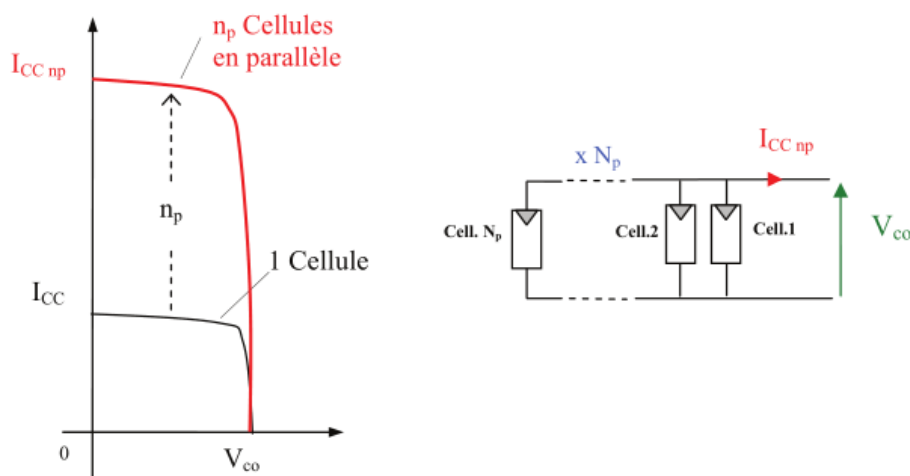


Figure 1.5. Caractéristique résultante d'un groupement constitué de n_p cellules identiques en parallèle [13].

1.4.3 Paramètres d'un module PV

Les paramètres essentiels d'un panneau PV sont :

- **La tension en circuit ouvert V_{co}**

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert V_{co} ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement) [15].

- **Le courant en court-circuit I_{cc}**

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit I_{cc} [15].

- **La puissance maximale**

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale V_{ppm} et à une intensité maximale I_{ppm} . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m²), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (Wc) [15].

- **Le rendement**

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit S la surface du module et E l'éclairement en W/m², ce rendement a pour formule [15] :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{S \times E} \quad (1.6)$$

- **Le facteur de forme**

Le facteur de forme est un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour évaluer la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Il est illustré sur la figure 1.6. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{\max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de révolution technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [14].

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{I_{cc} V_{co}} \quad (1.7)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température.

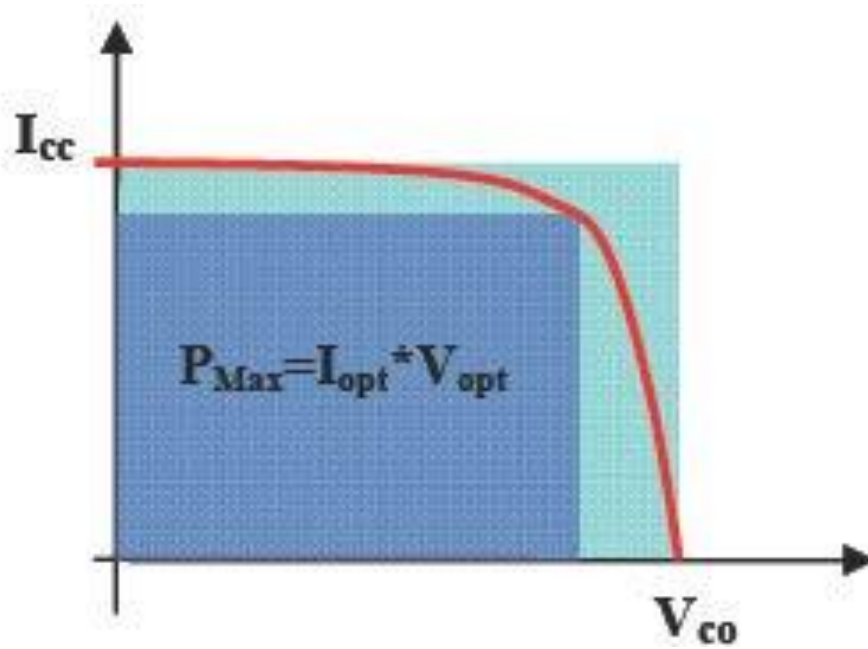


Figure 1.6. Facteur de forme pour une cellule PV.

1.4.4 Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque

La figure 1.7 représente la courbe $I=f(V)$ d'un panneau photovoltaïque typique dans des conditions de température et d'irradiation constante :

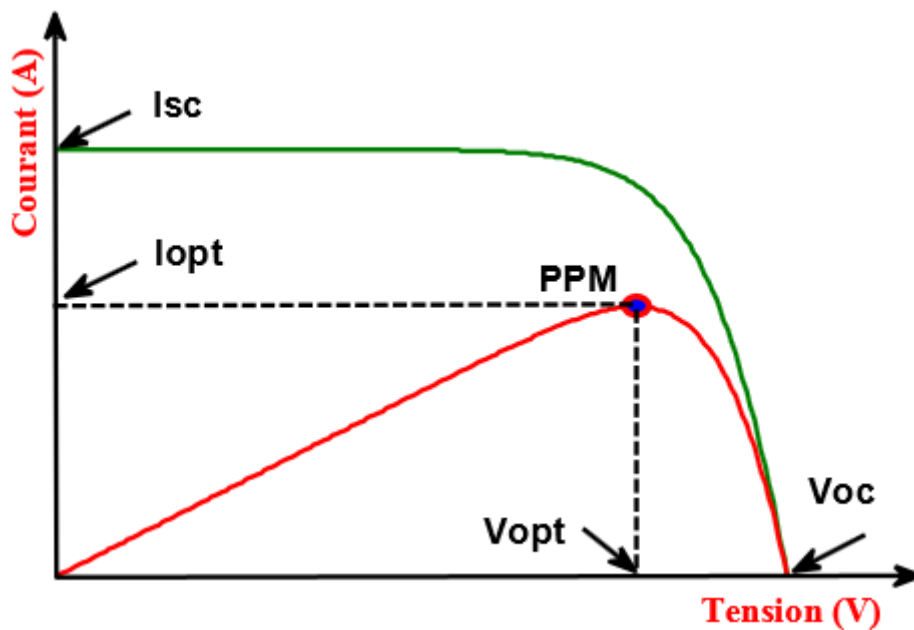


Figure 1.7. Caractéristiques électrique d'un module photovoltaïque [16].

Il est difficile de donner un caractère source de tension ou source de courant à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point PPM ou la puissance se trouve être maximale. Il est sans doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée, seule une charge dont la caractéristique passe par le point PPM permettra d'extraire la puissance maximale. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale, c'est ce que l'on appelle le Maximum Power Point Tracking (MPPT). Nous reviendrons par la suite sur cette technique.

1.4.5 Influence de l'irradiation sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension

La base des cellules photovoltaïques est une jonction PN, cette dernière réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue, mais toujours avec un coefficient de rendement très faible de l'ordre de 15%. La figure 1.8 représente les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour différents niveaux d'irradiation sur un module PV Kyocera KD210GH-2PU :

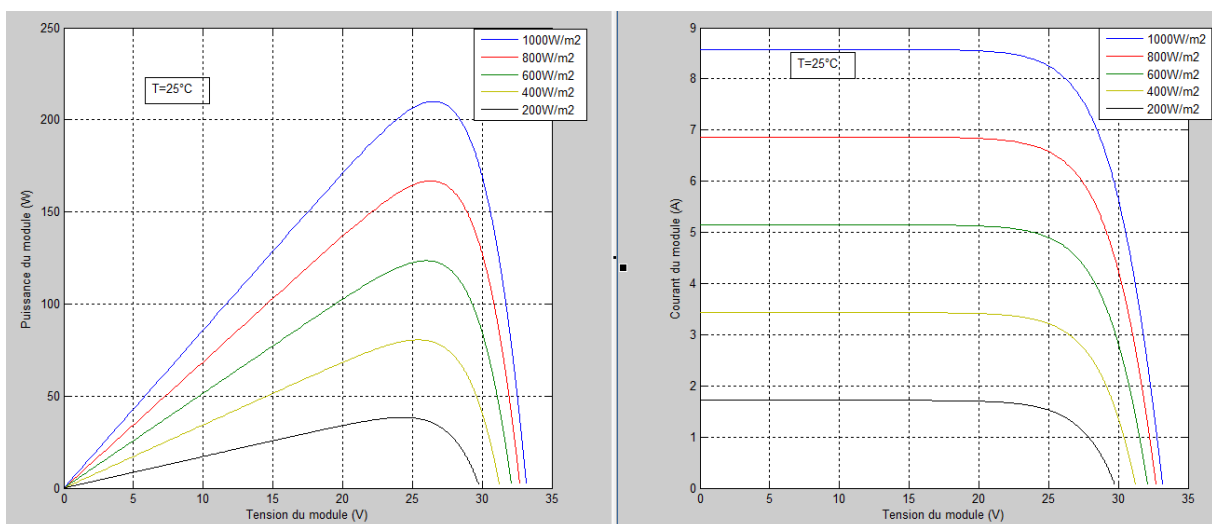


Figure 1.8. l'influence de l'irradiation sur les courbes caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

On remarque que la valeur du courant court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

1.4.6 Influence de la température sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la base des cellules photovoltaïques est une jonction PN. Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction. La figure 1.9 représente les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du panneau PV Kyocera KD210GH-2PU:

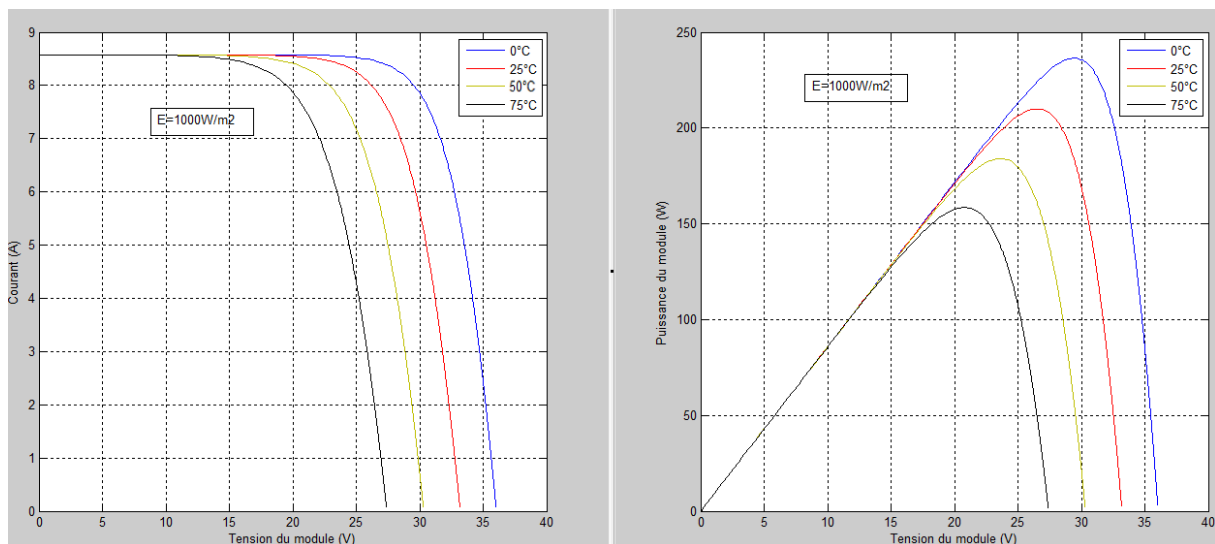


Figure 1.9. Influence de la température sur les courbes caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.

1.5 Avantages spécifiques du photovoltaïque

Par rapport aux autres sources renouvelables, le photovoltaïque offre des avantages particuliers :

- Il est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.

- L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- Il est totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.
- Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte (facteurs atmosphériques ou liquides, produits de nettoyage, risque d'accident physique,...) aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est une énergie purement propre et écologique.
- La maintenance et les réparations sont réduites à presque rien pour la partie photovoltaïque et à peu de chose pour l'électronique associée.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé des généralités sur les systèmes photovoltaïques, les cellules photovoltaïques passant par le principe de conversion de l'énergie solaire en électricité. Nous avons aussi traité les différents types de cellules et leur rendement, les modules photovoltaïques, les paramètres de celui-ci ainsi que l'influence de l'irradiation et la température sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

Chapitre 2 Etage d'adaptation et commande MPPT

2.1 Introduction

L'énergie solaire est considéré comme la source d'énergie alternative la plus préférable, elle offre la propreté, la fidélité et la gratuité contrairement à d'autres énergies. Cependant, l'efficacité de la conversion de l'énergie qui est liée à la charge présente des difficultés qui limitent la performance de cette source. Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles (autour de 20%) [17]. C'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie.

En effet, plusieurs études ont bien montré que l'énergie des photons convertie en électricité est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température et aussi selon la charge qui est connectée au générateur PV [17].

Pour remédier à ces influences, des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point à partir de 1968 afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit la charge ou l'irradiation solaire [18]. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature Recherche du Point de Puissance Maximale ou bien Maximum Power Point Tracking en anglo-saxon (MPPT).

Cette recherche est faite par l'association d'un étage d'adaptation entre le panneau solaire et la charge en plus de la commande MPPT. La figure 2.1 présente le schéma principe d'un tel fonctionnement.

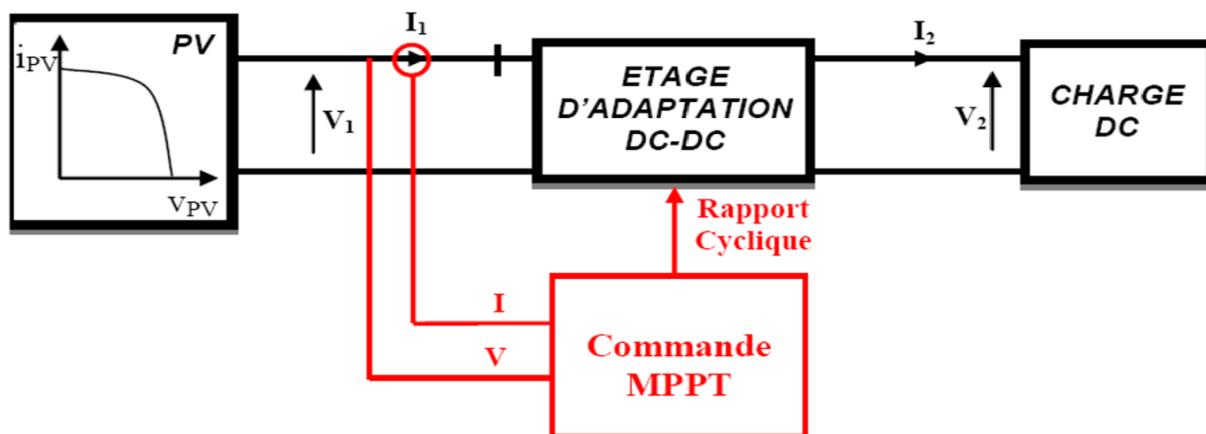


Figure 2.1. Schéma bloc d'un algorithme de recherche du PPM [19].

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», « Hill CLIMBING » et l'algorithme basé sur la logique floue en utilisant Matlab/Simulink dans le chapitre suivant.

2.2 Méthode de poursuite de puissance maximale

Un panneau photovoltaïque a des caractéristiques courant-tension (I/V) non linéaires. Sa puissance de sortie change avec les conditions atmosphériques. Il existe seulement des points (PPM) où la puissance est maximale [20]. La figure 1.7 dans le chapitre 1 montre la caractéristique I/V et la courbe de puissance d'un module PV avec le PPM.

L'efficacité d'un système photovoltaïque n'est améliorée si seulement si le panneau est actionné intentionnellement au PPM indépendamment des variations des conditions atmosphériques. Ceci peut être fait en accordant correctement le panneau avec la charge à l'aide des techniques qui détectent et localisent mécaniquement ou électriquement les PPM sans qu'à priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles étaient les raisons de ce changement [21]

Ces techniques sont appelées MPPT « maximum power point Tracking » en anglais ou souvent nommées « recherche de point de puissance maximale ». Elles sont utilisées pour extraire le maximum de puissance disponible à l'aide d'un algorithme implanté dans un calculateur et un étage d'adaptation à savoir un hacheur ou un onduleur selon l'exigence du système [22]. Le rôle de cette commande MPPT est de faire varier le rapport cyclique du Convertisseur Statique de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit le PM disponible à ses bornes [23].

Plusieurs algorithmes de la commande MPPT ont été développés récemment. Le choix de l'algorithme convenable reste éprouvant et dépend des avantages et des inconvénients de chaque algorithme. Dans notre travail, nous présentons quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale en détaillant les plus simples à savoir :

- Perturbation & observation (P&O) ;
- HILL CLIMBING.

2.2.1 Introduction à la commande MPPT

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, la puissance obtenue depuis les panneaux solaires est relativement faible et insuffisante, cela est dû aux conditions changeantes au niveau de l'ensoleillement et de la température, ces variations des conditions climatiques aboutissent au faible pourcentage de la puissance. Les figures 1.8 et 1.9 dans le chapitre précédent illustrent les fluctuations de la puissance P et du courant I en fonctions de la température et l'irradiation solaire.

En effet, sous les conditions changeantes, la puissance extractible est variable et fonction de la tension (ou du courant) imposée aux bornes du panneau photovoltaïque. Il est donc nécessaire que le système d'exploitation s'adapte pour extraire le plus de puissance possible : c'est ainsi que naît en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracker).

2.2.2 Commande MPPT

La commande MPPT, est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser

la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

2.2.3 Techniques de commande MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des calculateurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement. Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM), ce dernier est décrit en (figure 2.2) [19].

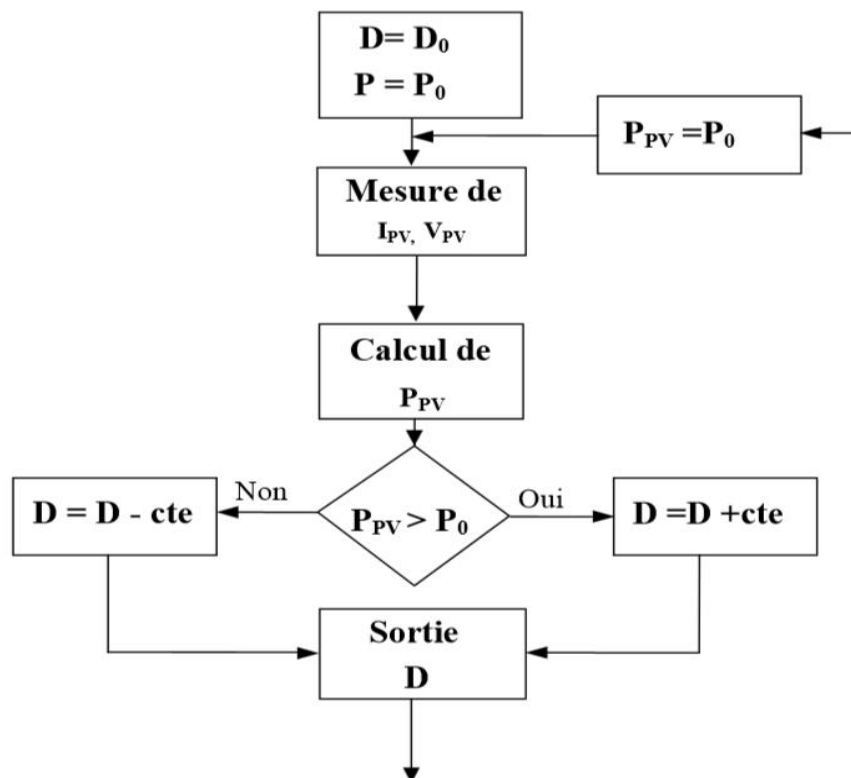


Figure 2.2. Principe de la première technique MPPT numérique [24].

Cet algorithme consiste à calculer la puissance à l'instant t_n à partir des mesures de I_{pv} et V_{pv} , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{n-1} de là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes

numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement [19].

Étant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une présentation de deux différentes MPPT existantes.

a Principe de la commande "Perturb and Observ" (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte [25,26]. Ainsi, comme le montre la figure 2.3, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [24].

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [24].

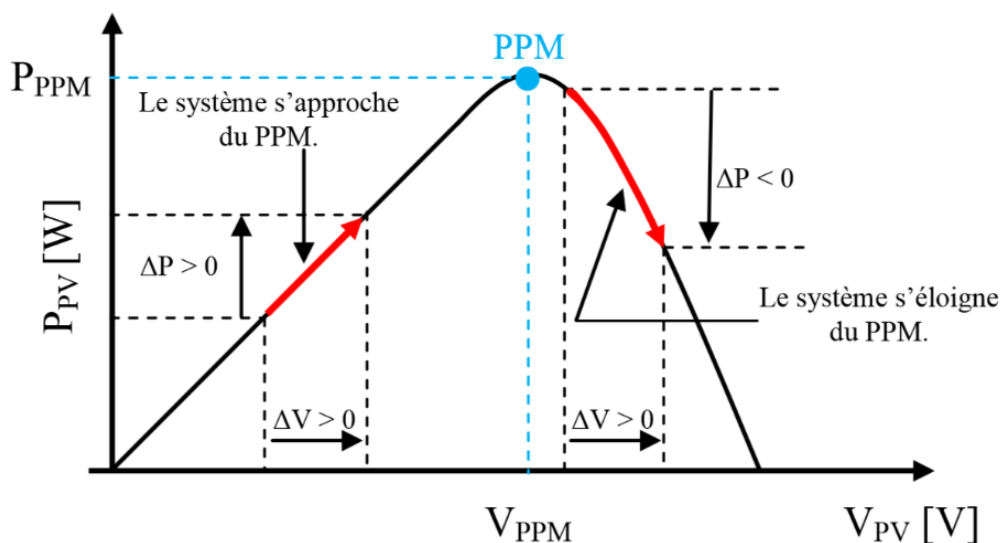


Figure 2.3. Recherche du PPM par la méthode (P&O) [25].

La figure 2.4 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 [24].

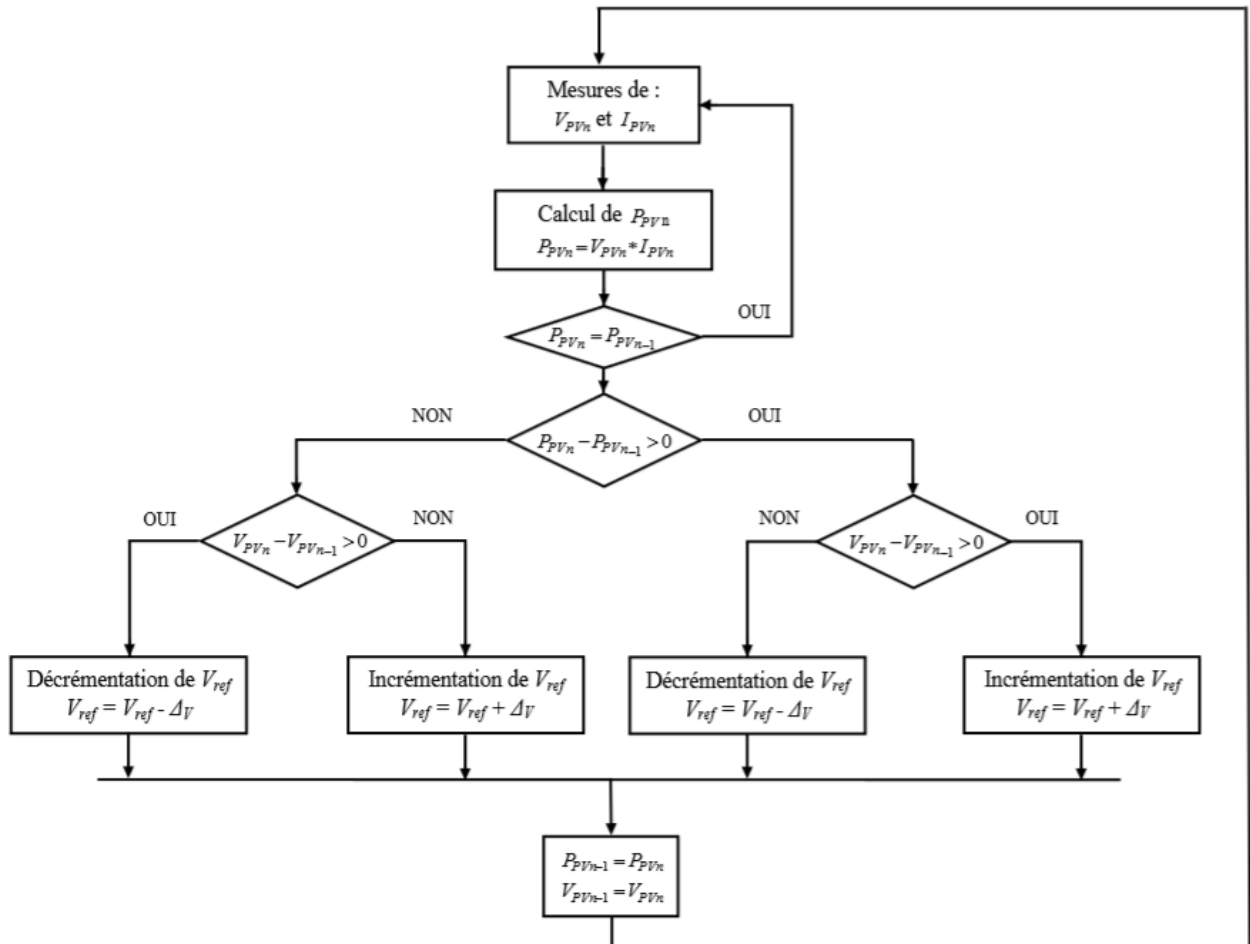


Figure 2.4. Algorithme type de la méthode P&O [19].

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Néanmoins, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [24].

En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM [24].

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure 2.5.

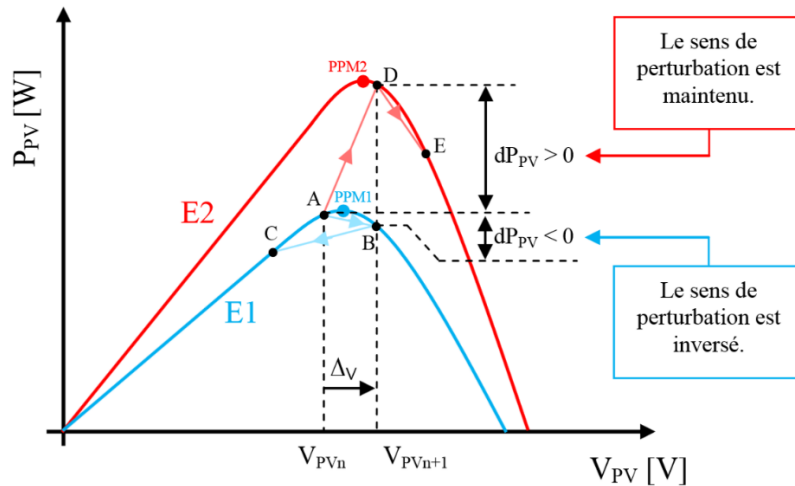


Figure 2.5. Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation [19].

Pour plus de clarté, prenons l'exemple d'un éclairement donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur ΔV , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairement, 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 [24].

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. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables, de fortes lacunes au niveau de la commande [24].

b Principe des commandes "Hill Climbing"

La technique de contrôle nommée Hill Climbing [27-28] consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la caractéristique de la puissance en fonction du rapport cyclique P(D). Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque $\frac{dP_{PV}}{dD} = 0$, comme le montre la figure 2.6.

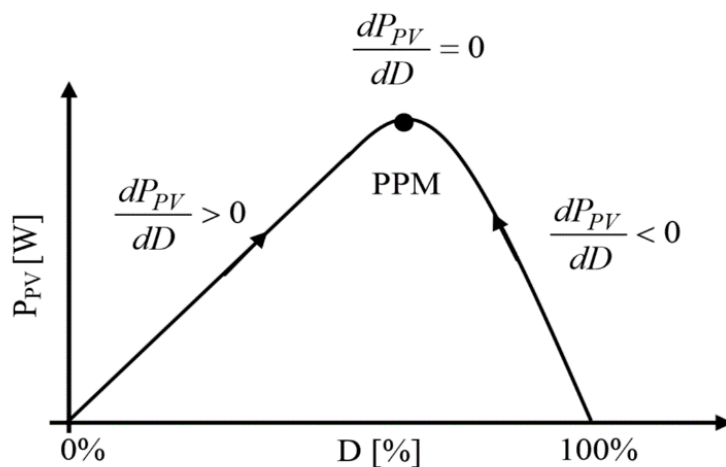


Figure 2.6. Relation entre P_{PV} et le rapport cyclique D du convertisseur statique [29].

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la figure 2.7. Hill Climbing implique une perturbation dans le rapport cyclique du convertisseur de puissance. Dans le cas d'un GPV connecté à un convertisseur de puissance, la perturbation du rapport cyclique du convertisseur de puissance perturbe le courant du générateur photovoltaïque et perturbe la tension du générateur photovoltaïque par conséquent [51]. L'incrément

(décrémentation) de la tension augmente (diminue) la puissance lors de l'utilisation sur la gauche de la MPP et diminue (augmente) la puissance quand sur la droite du MPP. Par conséquent, s'il y a une augmentation de la puissance, la perturbation subséquente devrait être gardé le même pour atteindre le MPP et s'il y a une diminution de la puissance, la perturbation devrait être inversée. Le processus est répété périodiquement jusqu'à la MPP est atteinte. Le système oscille alors autour du MPP. L'oscillation peut être réduite en réduisant la taille de pas de perturbation. Cependant, une taille plus petite perturbation ralentit le MPPT [52].

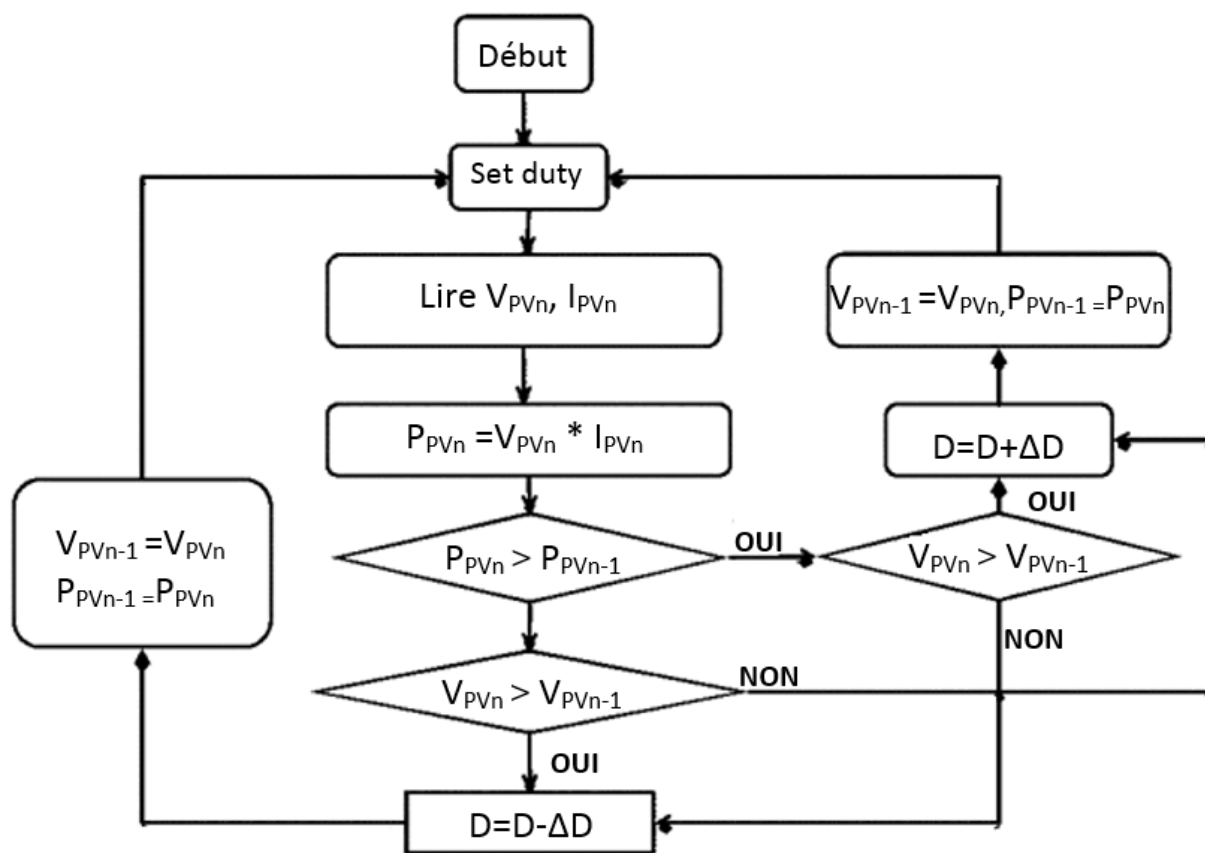


Figure 2.7. Algorithme type de la commande Hill Climbing [24].

Le fonctionnement de cette commande est illustré sur la figure 2.8 en reprenant la chaîne de conversion PV élémentaire.

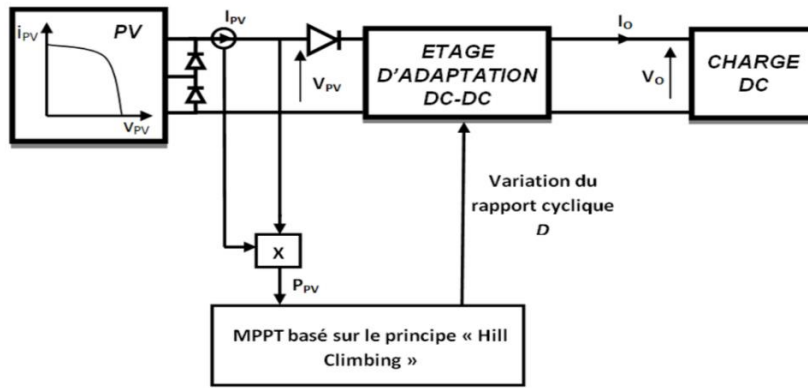


Figure 2.8. Schéma de principe de la commande Hill Climbing [24].

L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède les mêmes inconvénients que la méthode P&O concernant des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques [19].

2.3 Étage d'adaptation

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé qui dans notre cas va nous permettre de poursuivre le point de fonctionnement optimum.

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET.

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture égal à $(D.T)$ et un temps d'ouverture égal à $((1-D).T)$ ou [30] :

$$f_s = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

T : étant la période du signal de commande

Et avec un rapport cyclique D défini comme étant le rapport de fermeture du commutateur ton et la somme $T = t_{on} + t_{off}$ des temps de fermeture et d'ouverture de ce commutateur :

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.2)$$

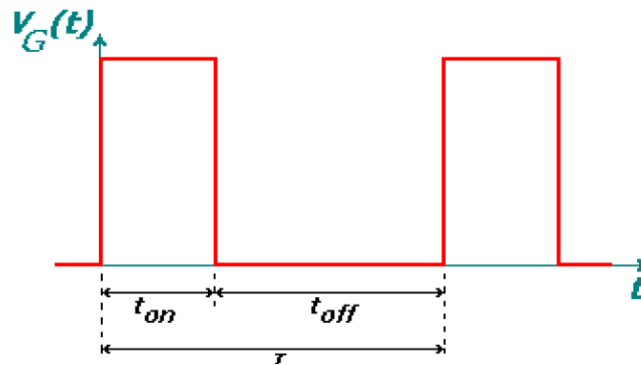


Figure 2.9. Forme du signal de commande du commutateur S [31].

Il existe différents types de convertisseurs DC-DC :

- Les éleveurs (BOOST) dans lesquels $V_{out} > V_{in}$.
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_{out} < V_{in}$.
- Les éleveurs-abaisseurs (BUCK-BOOST) qui est un mélange entre les deux précédents.

2.3.1 Hacheur Abaisseur (Buck)

Le circuit électrique d'un hacheur de type dévolteur (abaisseur), appelé aussi convertisseur buck, est représenté par la figure 2.10. L'interrupteur S fournit un train d'impulsions ce qui soumet la diode D à une tension rectangulaire la contraignant ainsi à basculer en continue entre état passant et état bloqué. Cette tension rectangulaire sera par la suite filtrée et transformée en une tension quasi continue avec une valeur égale à la tension moyenne de la tension carrée... Il est évident que la valeur moyenne de la tension est directement liée à la durée de fermeture de l'interrupteur S et donc au rapport cyclique [32].

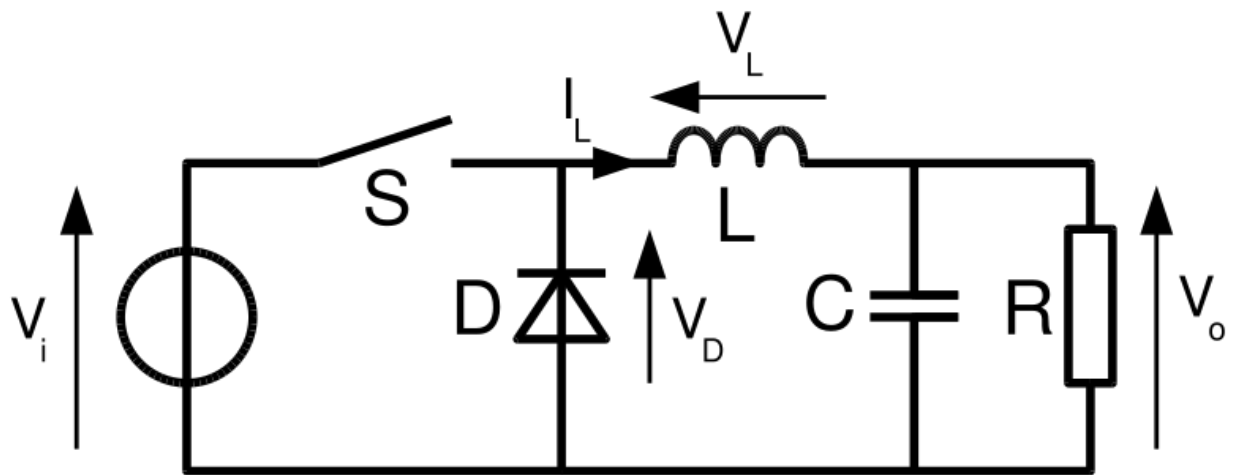


Figure 2.10. Circuit électrique de base du hacheur dévolteur [33].

2.3.2 Hacheur éleveurs-abaisseurs (Buck-Boost)

En combinant les deux fonctions que présentent les deux types de convertisseurs précédents, nous obtenons un convertisseur survolteur-dévolteur ou encore appelé Buck-Boost. Dans ce type de convertisseurs (figure 2.11), la tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée [32].

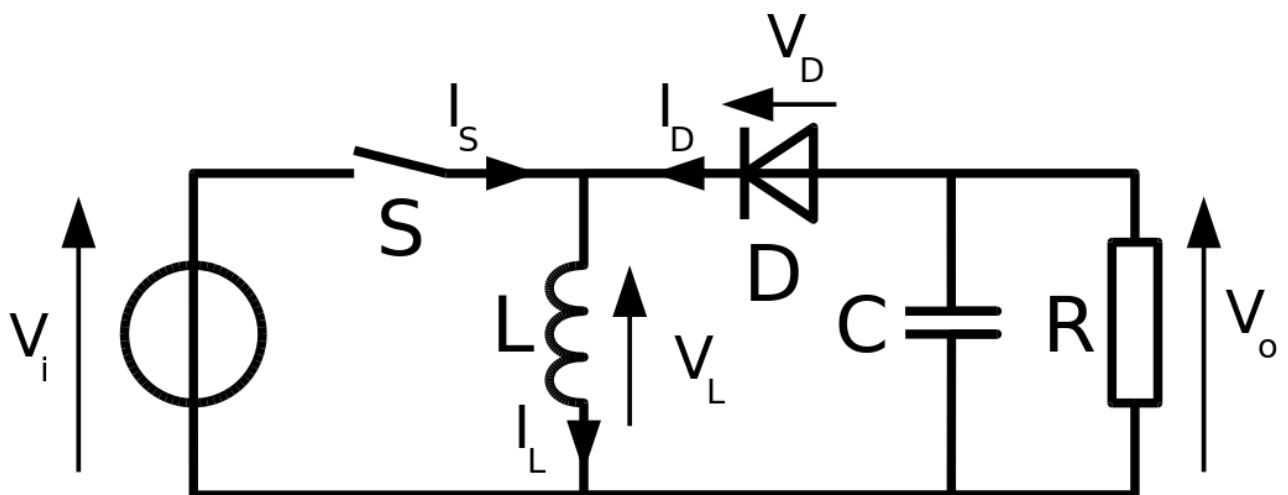


Figure 2.11. Circuit électrique de base du convertisseur Buck-Boost [33].

2.3.3 Hacheur élévateurs (Boost)

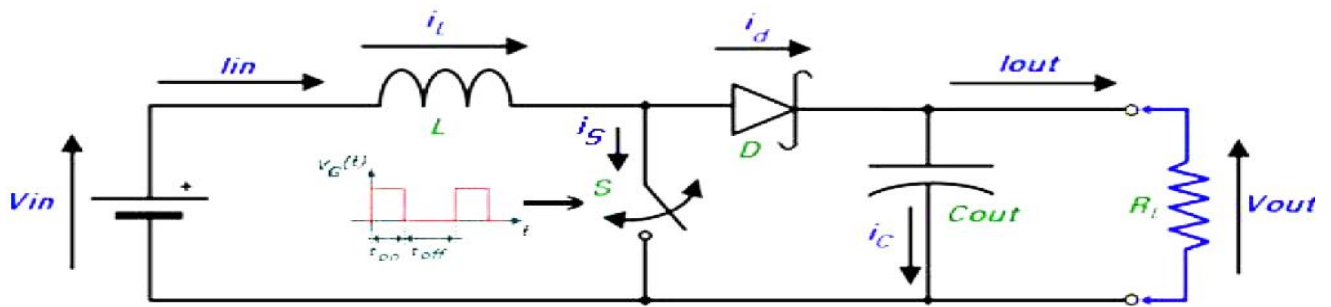


Figure 2.12. Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "boost"[31].

Le convertisseur survolteur, appelé aussi convertisseur boost, permet à partir d'une tension d'entrée continue, d'avoir une tension continue bien plus grande. Ce type de convertisseur est très utilisé pour remédier à l'utilisation d'un grand nombre de batteries par contrainte d'espace. En effet, le nombre de batteries nécessaires pour obtenir une tension donnée peut être réduit tout en atteignant la tension souhaitée en utilisant un convertisseur Boost.

Le circuit électrique d'un hacheur de type boost contient les mêmes éléments que celui du hacheur Buck mais disposés différemment comme le montre la figure 2.12. Dans cette configuration, la tension de sortie est tout le temps supérieure à la tension d'entrée [32].

Dans notre travail, nous s'intéressons au hacheur « Boost », qui sera étudié en détaille par la suite :

a Expression du courant de la bobine [31]

▪ Courant moyen

En fonctionnement normal, le circuit est en "conduction continue" i.e. I_L n'est jamais nul.

Conformément aux suppositions, citées en haut, le circuit est supposé être sans pertes électriques (idéalisé avec un rendement de 100 %), ce qui nous permet d'écrire :

$$P_{in} = P_{out} \quad (\eta = 100\%, \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}) \quad (2.3)$$

D'où
$$V_{in} \cdot I_{Lmoy} = I_{out} \cdot V_{out} \quad (2.4)$$

Avec :

$$I_{L\text{moy}} = I_{\text{in}}$$

- **Courant instantané**

En supposant qu'on est en mode de conduction continue (CCM), le circuit peut être décomposé en deux topologies distinctes, selon l'état du switch (S) durant une période "T" du signal de commande : soit interrupteur fermé ou interrupteur ouvert. Voir figures ci-dessous.

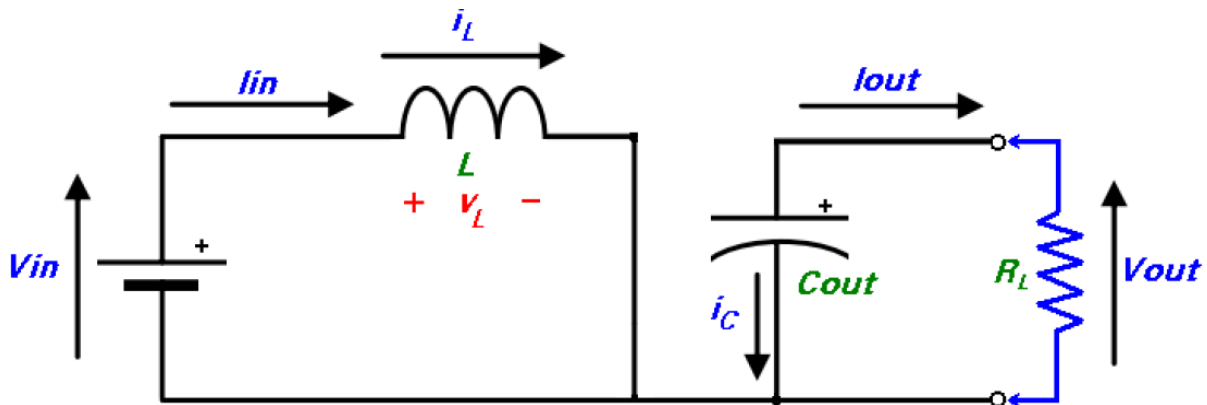


Figure 2.13. Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps DT [31].

- Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{\text{on}})$: phase d'accumulation d'énergie

L'interrupteur "S" est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de la source, dans ce cas I_L augmente à un taux de:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{\text{in}}}{L} \quad (2.5)$$

En intégrant les deux parties de l'égalité, on trouve que :

$$I_{L1}(t) = \frac{V_{\text{in}}}{L} t + I_{L\text{min}} \quad (2.6)$$

On voit bien que $I_L(t)$ a une pente positive, ce qui prouve que durant cette phase l'inducteur se charge.

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{L\text{on}} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_{\text{in}} dt}{L} = \frac{V_{\text{in}} \cdot D \cdot T}{L} \quad (2.7)$$

Comme définit en haut, D étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur "S" conduit. Il est compris entre 0 ("S" ne conduit jamais) et 1 ("S" conduit tout le temps).

- Pour $DT \leq t \leq (1 - D) T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

L'interrupteur "S" est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec la source d'énergie. Sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité, qui va fixer la tension de sortie. Le circuit électrique équivalent dans ce cas est donné par la Figure 2.14.

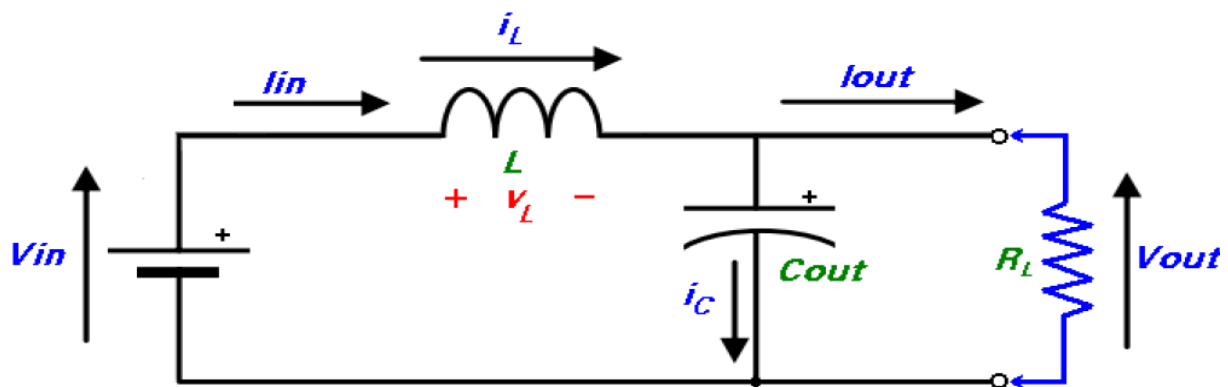


Figure 2.14. Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1 - D) T$ [31].

Dans ce cas, i_L diminue avec un taux de :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \quad (2.8)$$

En intégrant les deux parties de l'égalité, on trouve que :

$$i_{L2}(t) = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} t + I_{LMAX} \quad (2.9)$$

Dans le cas d'un convertisseur DC/DC "boost" l'inégalité : $V_{out} \geq V_{in}$ est toujours vérifiée. Donc, dans ce cas $i_L(t)$ a une pente négative, ce qui prouve que durant cette phase la self se décharge.

La variation de i_L durant cet état bloqué est :

$$\Delta I_{Loff} = \int_{DT}^{(1-D)T} di_L = \int_{DT}^{(1-D)T} \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} dt = \frac{(V_{in} - V_{out})(1-D)T}{L} \quad (2.10)$$

On remarque que durant les deux phases de conduction (selon que le commutateur "S" est fermé ou ouvert) I_L oscille (augmente puis diminue) dans une bande de largeur ΔI_L autour d'une valeur moyenne $I_{L\text{moy}} = I_{in}$. Voir figure ci-dessous.

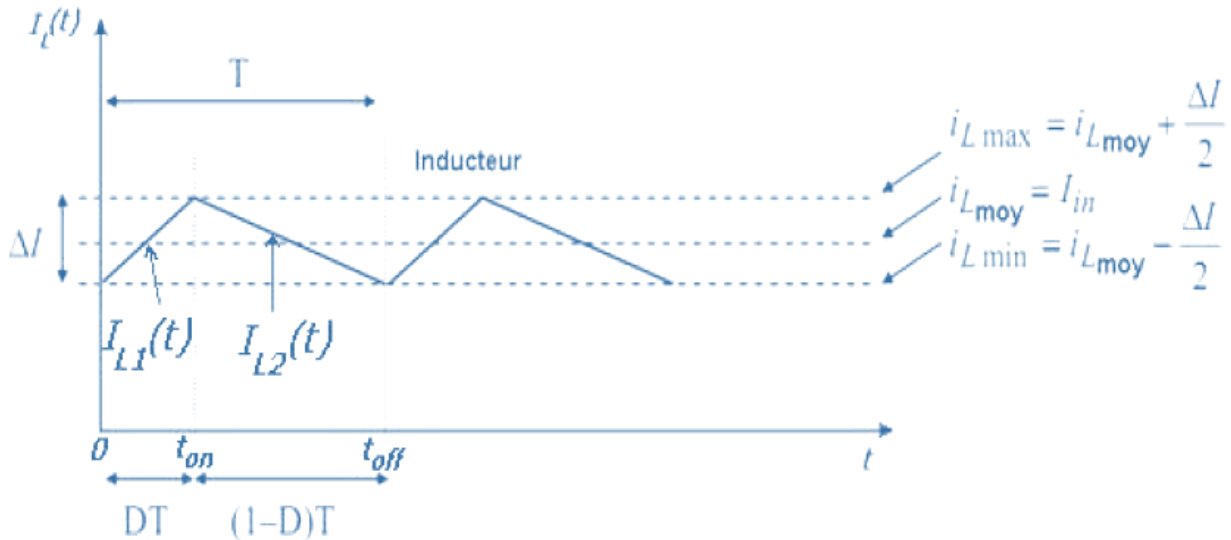


Figure 2.15. Variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps [31].

A travers la courbe d'évolution de $I_L(t)$, on voit bien que pour garantir un fonctionnement en mode de conduction continu, i.e. un courant d'inducteur non nul, il faut toujours respecter la condition suivante :

$$i_{L\text{min}} \geq 0 \quad (2.11)$$

Ce qui est équivalent à :

$$I_{in} \geq \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.12)$$

Fonction de transfert (Gain) du convertisseur DC/DC [31]

En considérant que le régime permanent est atteint, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2 \quad (2.13)$$

En conséquence, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Il advient donc :

$$\Delta I_{L\text{on}} + \Delta I_{L\text{off}} = 0 \quad (2.14)$$

Soit :

$$\Delta I_{L\text{on}} + \Delta I_{L\text{off}} = \frac{V_{\text{in}} \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_{\text{in}} - V_{\text{out}})(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.15)$$

Après simplifications, nous pouvons réécrire cette équation de la façon suivante :

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{(1-D)} \quad (2.16)$$

Ce qui donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_{out} .

Et puisque par hypothèse, on avait : $P_{\text{in}} = P_{\text{out}}$ (2.17)

Nous aurons également : $I_{\text{out}} = (1 - d) \cdot I_{\text{in}}$ (2.18)

Dans le cas où : le rendement énergétique de l'étage est : $\eta \neq 1$, chose qui est trop proche de la réalité pratique. Nous pourrions également écrire :

$$V_{\text{out}} = \eta \cdot \frac{V_{\text{in}}}{(1-D)} \quad (2.19)$$

et $I_{\text{out}} = \eta \cdot (1 - D) \cdot I_{\text{in}}$ (2.20)

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec D, et que théoriquement elle peut être infinie lorsque D se rapproche de 1.

Les figures ci-dessous représentent l'allure des principaux signaux dans le convertisseur en mode de fonctionnement CCM.

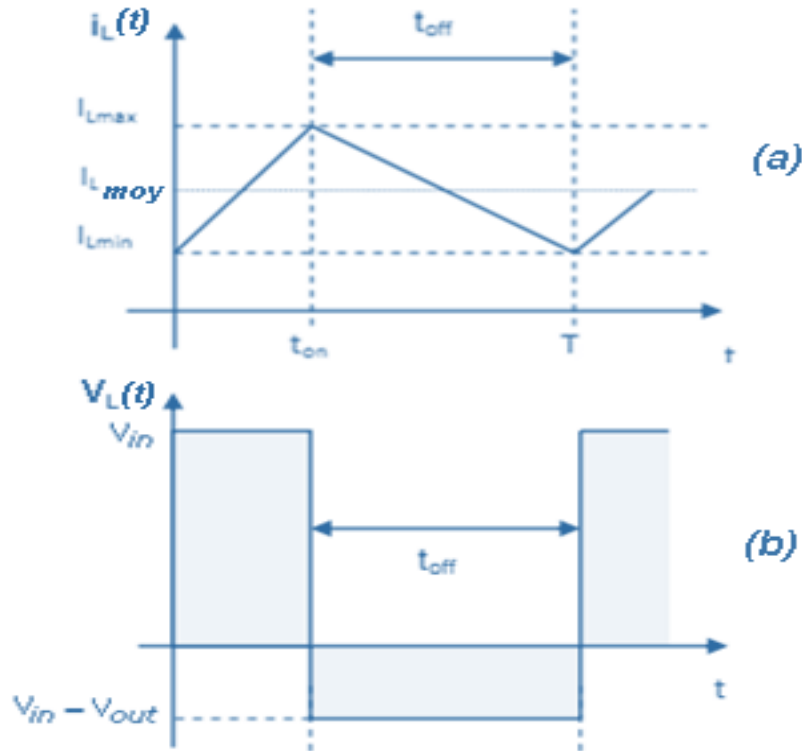


Figure 2.16. Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T [31].

Courant circulant dans les éléments semi-conducteurs :

- **Courant dans la Diode (D) [31]**

- Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie Dans cette phase, le switch "S" est fermé et conformément au schéma électrique de la Figure 2.13, la diode est polarisée en sens inverse : le courant moyen la traversant est nul.

$$I_D(t) = 0 \quad (2.21)$$

- Pour $DT \leq t \leq (1 - D) T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Conformément au schéma électrique de la Figure 2.14, et selon la loi des mailles, nous avons :

$$I_D(t) = I_{L2}(t) = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} t + I_{LMAX} \quad (2.22)$$

- **Courant dans le switch "S" [31]**

- Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie.

En suivant le même raisonnement que le précédent, et si on admet La résistance de commutation R_{DS_on} est nulle, nous avons :

$$I_S(t) = I_{L1}(t) = \frac{V_{in}}{L}t + I_{Lmin} \quad (2.23)$$

- Pour $DT \leq t \leq (1 - D) T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Le switch "S" est ouvert et si on maintient la supposition : La résistance de commutation R_{DS_off} est infinie, donc :

$$I_S(t) = 0 \quad (2.24)$$

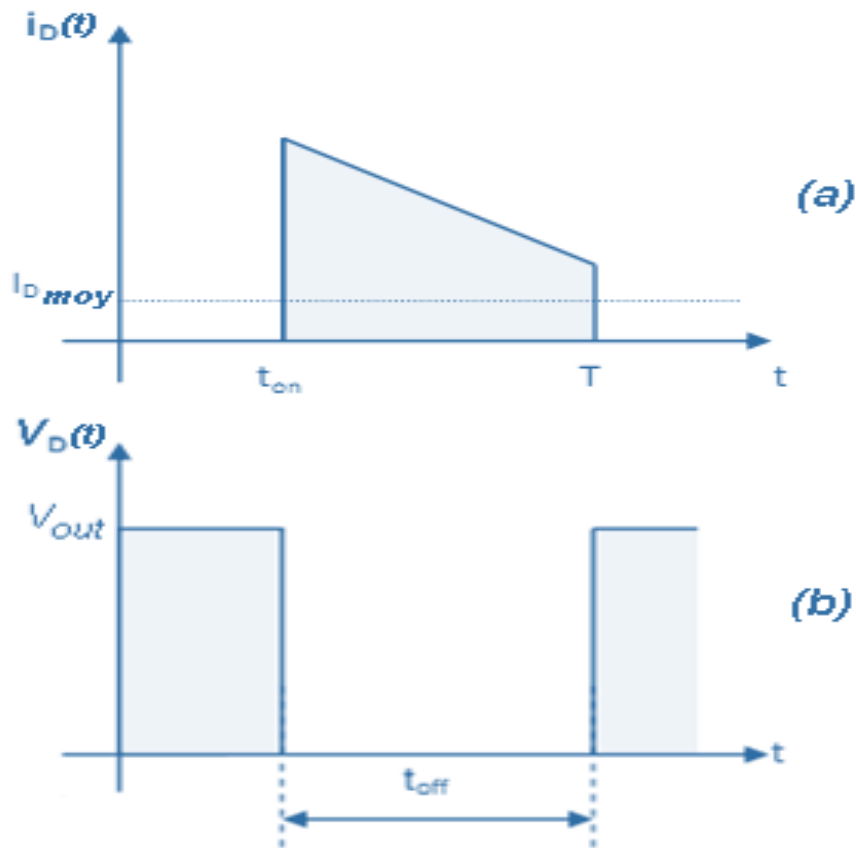


Figure 2.17. Allures de la tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T [31].

▪ **Courant dans le condensateur de sortie C_{out} [31]**

- Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie.

En se référant au schéma de la Figure 2.13, on voit bien que la diode est non conductrice, le condensateur mis en parallèle avec la charge R_L alimente celle-ci, en se déchargeant, avec un courant constant I_{out} et dont l'expression est donnée par :

$$I_{out}(t) = \frac{V_{out}}{R_L} = cste$$

Donc :

$$I_{Cout}(t) = I_{out}(t) = \frac{V_{out}}{R_L} = cste \quad (2. 25)$$

- Pour $DT \leq t \leq (1 - D) T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Le condensateur est connecté à la source, via la bobine L , selon la loi des nœuds, nous avons :

$$I_{Cout}(t) = I_{L2}(t) - I_{out}$$

D'où :

$$I_{Cout}(t) = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} t + I_{LMAX} - \frac{V_{out}}{R_L} \quad (2. 26)$$

L'allure du courant circulant dans le condensateur C_{out} est illustrée dans la Figure (2. 20-c).

On note également par ici que seule la composante variable de $I_L(t)$ passe à travers C_{out} , l'autre composante, i.e. la composante continue sera directement transférée à la charge. Et selon le principe d'équilibre de la charge d'un condensateur au cours d'une période de commutation, le courant moyen circulant dans le condensateur est nul.

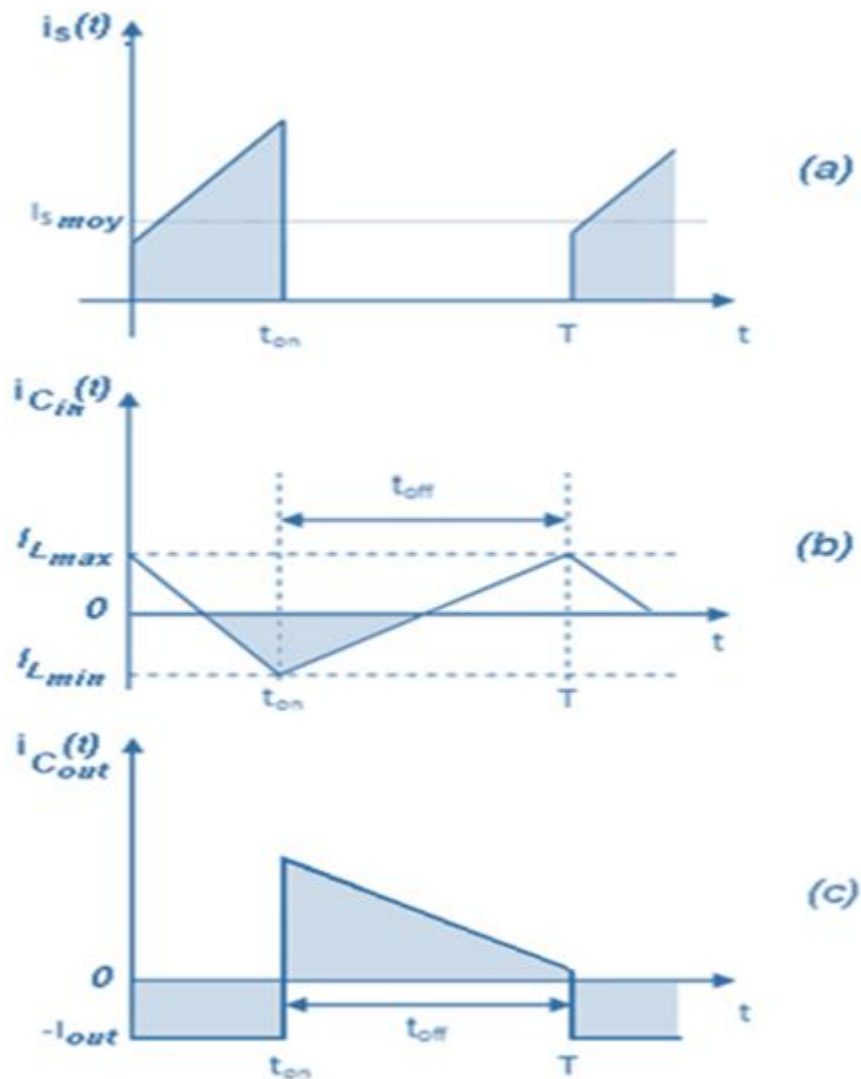


Figure 2.18. Allures des tensions d'entrée et au bornes de la bobine pendant une période de conduction T [31].

▪ **Courant dans le condensateur d'entrée C_{in} [31]**

- Pour $0 \leq t \leq DT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie.

Vu que C_{in} est placé en aval du switch "S", alors, lors de tous les intervalles de commutation l'expression mathématique qui donne la valeur de $i_{Cin}(t)$ sera toujours la même.

En utilisant le schéma de la figure ci-dessous et la loi des nœuds on a :

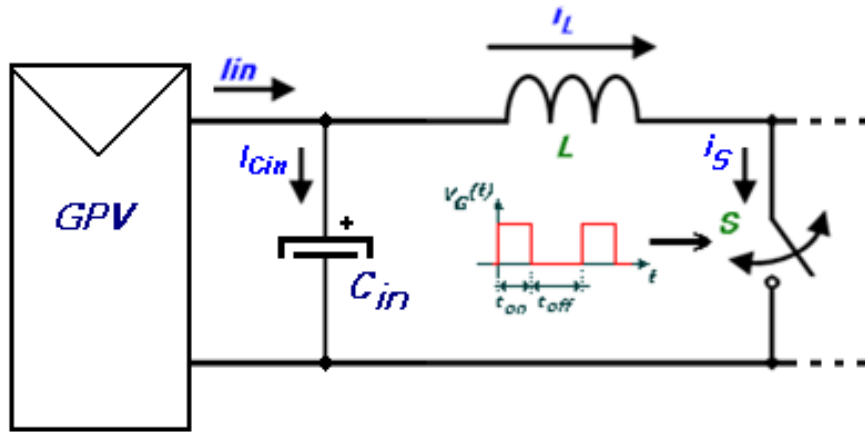


Figure 2.19. Courant circulant dans le condensateur d'entrée C [31].

$$I_{Cin}(t) = I_{in} - I_{L1}(t) = I_{Lmoy} - I_{L1}(t) \quad (2.27)$$

- Pour $DT \leq t \leq (1 - D)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

En suivant le même raisonnement que celui adopté pour l'intervalle t_{on} , on a :

$$I_{Cin}(t) = I_{in} - I_{L2}(t) = I_{Lmoy} - I_{L2}(t) \quad (2.28)$$

L'allure du courant circulant dans le condensateur C_{in} est illustrée dans la Figure 2.18(b).

b Expression et évolution de l'impédance d'entrée R_{IN} [31]

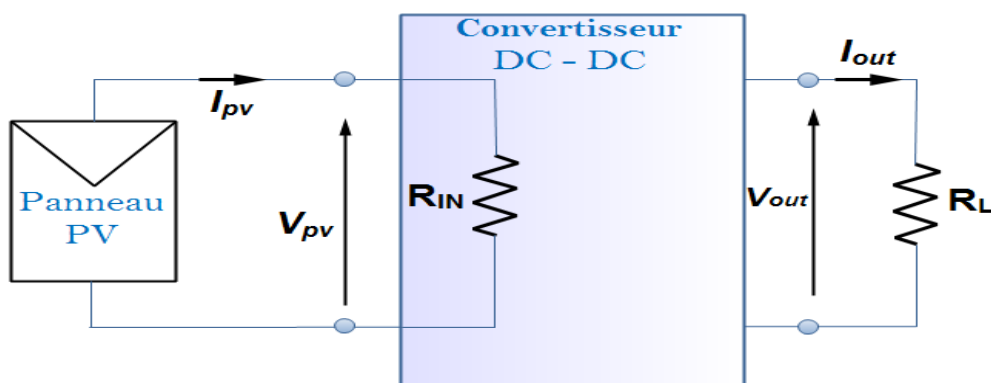


Figure 2.20. Impédance d'entrée de l'ensemble convertisseur + charge résistive [31].

D'après le schéma de la Figure 2.15, on a :

$$R_{IN} = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (2.29)$$

et

$$R_L = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (2.30)$$

En remplaçant V_{in} et I_n dans (3. 21) par leurs expressions dans les équations (3. 16) et (3. 18) on trouve :

$$R_{IN} = \frac{(1-D)^2 \cdot V_{out}}{I_{out}} \quad (2. 31)$$

D étant le rapport cyclique du signal de commande du switch "S".

Ce qui donne par la fin :

$$R_{IN} = (1 - D)^2 \cdot R_L \quad (2.32)$$

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{in}}{R_L}} \quad (3. 33)$$

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le principe de la poursuite du point de puissance maximale d'un panneau solaire, et on a présenté les deux méthodes les plus populaires de la commande MPPT (P&O, Hill Climbing), ainsi que les divers convertisseurs DC/DC, avec le fonctionnement détaillé du hacheur Boost.

Chapitre 3 La Logique Floue

3.1 Introduction

Une des caractéristiques du raisonnement humain est qu'il est généralement fondé sur des données imprécises ou même incomplètes. En effet, les connaissances dont nous disposons sur un système quelconque sont généralement incertaines ou vagues, soit parce que nous avons un doute sur leur validité ou alors nous éprouvons une difficulté à les exprimer clairement. De ce fait on a eu besoin d'un nouveau type de raisonnement qui se rapproche plus de celui-ci et qu'on peut traiter d'une façon mathématique rigoureuse.

Le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Berkeley (Californie) fut le premier à avoir effectué des travaux sur la logique floue en 1965, il a ainsi introduit une théorie qui présente une extension de la logique classique (booléenne), et permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. Quelques années plu-tard cette théorie fut appliquée à des problèmes de réglage et de commande.

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler.

Afin d'introduire la méthode du contrôleur floue optimisé, on va commencer par donné quelque notions de base sur la logique floue, puis les différentes étapes de la conception d'un régulateur flou et on finira par aborder la méthode MPPT a base de logique floue.

3.2 Logique floue

3.2.1 La théorie des sous-ensembles floue

Dans la théorie des sous-ensembles flous, basée sur la logique floue, le degré d'appartenance est une fonction qui peut prendre des valeurs réelles comprises entre 0 et 1. Contrairement aux grandeurs Booléennes qui prennent comme valeur 0 ou 1.

Ceci peut être traduit par la formulation mathématique suivante :

Soit X un ensemble de référence ou encore appelé Univers de discours [34, 35, 36].

Pour une variable x on définit un ensemble classique A de X par le degré d'appartenance μ_A , [37], telle que :

$$\begin{aligned} \mu_A : \quad X &\longrightarrow \{0,1\} & (3.1) \\ x &\longmapsto \mu_A \end{aligned}$$

Pour une variable floue x on définit l'ensemble flou A de X par le degré d'appartenance [38, 39, 40, 36], telle que :

$$\begin{aligned} \mu_A : \quad X &\longrightarrow [0,1] & (3.2) \\ x &\longmapsto \mu_A \end{aligned}$$

L'ensemble numérique des valeurs réelles que prend la variable floue x est appelé univers de discours, et $\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble flou A.

De cela, on définit un sous-ensemble flou A de l'univers de discours comme étant l'ensemble des éléments ayant la propriété $\mu_A(x)$. On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenances, chacune caractérise un sous-ensemble flou. L'association de ces sous-ensembles flous sur l'univers de discours donne l'ensemble flou de la variable floue x [38, 39, 36, 41].

On utilise généralement le terme ensemble flou au lieu de sous-ensemble flou, par abus de langage, conformément à la traduction du terme « fuzzy set ».

3.2.2 Variable linguistique

Une variable linguistique est représentée par un triplé (V, X, T_V) dans lequel V est une variable (la vitesse, la température ...) définie sur un ensemble de référence X (ses valeurs peuvent être n'importe quel élément de X). On note $T_V(A_1, A_2, \dots)$ un ensemble, fini ou infini, des sous-ensembles flous de X , qui sont utilisés pour caractériser V . Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenance.

Par exemple, si la vitesse est interprétée comme une variable linguistique, alors son ensemble de termes $T_{\text{vitesse}} = \{\text{lente, moyenne, rapide} \dots\}$ où chaque terme est caractérisé par un ensemble flou.

Ces termes peuvent être définis comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenance sont montrées sur la figure (3.1).

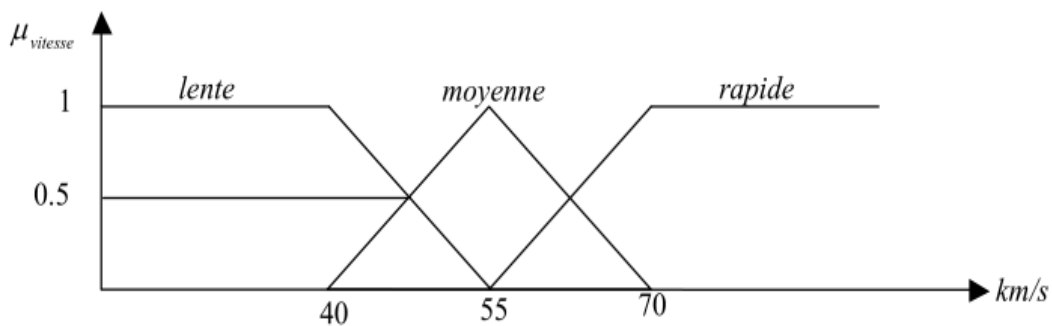


Figure 3.1. Représentation graphique des termes linguistiques.

3.2.3 Fonctions d'appartenance

Le plus souvent les fonctions d'appartenance sont décrites par des formes triangulaires ou trapézoïdales vu leurs simplicité [43] Figure 3.2. Cependant, il existe d'autres formes, dont les plus connues, sont présentées par des fonctions gaussiennes ou par combinaison de ces fonctions [48].

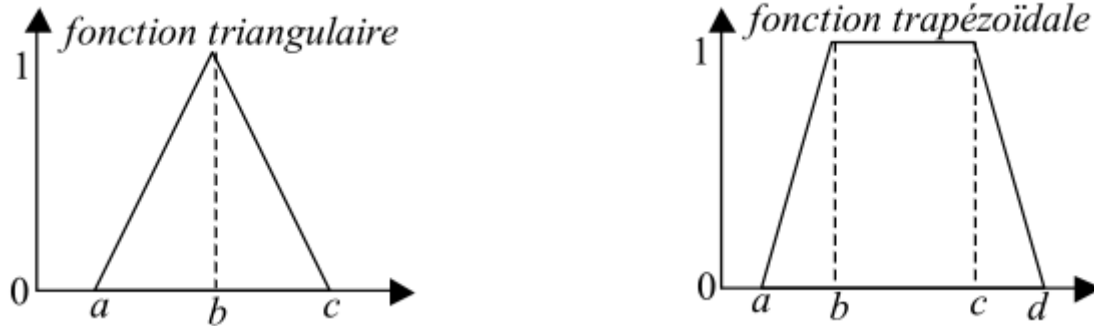


Figure 3.2. Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

3.2.4 Opérations sur les sous-ensembles flous et normes

Les opérations sur les sous-ensembles flous, sont définis afin de savoir, si on peut construire un sous-ensemble flou défini par les degrés avec lesquels μ_A n'est pas satisfaite ou si on peut concevoir un sous-ensemble flou défini par les degrés avec lesquels deux propriétés sont satisfaites simultanément. Comme dans la théorie des ensembles classique, on définit l'égalité, l'inclusion, l'intersection, l'union des ensembles flous, ainsi que le complément d'un ensemble flou. Ces relations sont traduites respectivement par les opérateurs "=", " \subseteq ", "et", "ou" et "non".

On définit deux ensembles flous A, B, et l'élément flou x de l'univers de discours :

$$A = B \Leftrightarrow \mu_A = \mu_B \quad (3.3)$$

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A \leq \mu_B \quad (3.4)$$

$$x \text{ appartient à } A \text{ et à } B \Leftrightarrow x \in A \cap B \Leftrightarrow \mu_{A \cap B}(x) \quad (3.5)$$

$$x \text{ appartient à } A \text{ ou à } B \Leftrightarrow x \in A \cup B \Leftrightarrow \mu_{A \cup B}(x) \quad (3.6)$$

$$x \text{ appartient au complément de } A \Leftrightarrow x \in A^c \Leftrightarrow \mu_{A^c}(x) \quad (3.7)$$

L'intersection de deux ensembles flous peut être réalisée par une norme triangulaire (t-norme) noté « T ». Et l'union est réalisée par une conorme triangulaire (t-conorme) notée « \perp » [34, 38, 42].

L'opérateur « et » correspond à l'intersection de deux ensembles flous A et B peut être réalisé par des t-norme telle que :

- La fonction « Min » : $\mu_{A \cap B}(x) = T(\mu_A, \mu_B) = \text{Min}(\mu_A, \mu_B)$ (3.8)

- La fonction arithmétique « produit » : $\mu_{A \cap B}(x) = T(\mu_A, \mu_B) = \mu_A \times \mu_B$ (3.9)

L'opérateur «ou» correspond à l'union de deux ensembles flous A et B peut être réalisé par :

- La fonction « Max » : $\mu_{A \cup B}(x) = \perp(\mu_A, \mu_B) = \text{Max}(\mu_A, \mu_B)$ (3.10)

- La fonction arithmétique 'somme' : $\mu_{A \cup B}(x) = \perp(\mu_A, \mu_B) = \mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B$ (3.11)

- L'opérateur «non» est réalisé par négation : $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$ (3.12)

3.2.5 Propositions floues

a Propositions floues élémentaires

Une proposition floue élémentaire est définie à partir d'une variable linguistique (V, X, Tv) par la qualification « V est A », pour une caractérisation floue A, appartenant à Tv.

b Propositions floues générales

Une proposition floue générale est obtenue par la composition de propositions floues élémentaires « V est A », « W est B » ... pour des variables linguistiques V, W

Plus généralement, on peut construire des propositions floues par conjonction, disjonction ou implication, par exemple de la forme « si V est A et W est B alors U est C » (si la taille est moyenne et le prix est peu cher, alors l'achat est conseillé).

3.2.6 Raisonnement en logique floue

Avec l'unique schéma de raisonnement (Si les conditions sont remplies, Alors la conclusion est validée) et les trois opérateurs Et, Ou et Non, nous pouvons déjà prendre un grand nombre de décisions logiques Nous produisons aussi une nouvelle information (une décision) à partir d'informations anciennes.

Le raisonnement flou fait appel à trois notions et étapes fondamentales :

- l'implication floue,
- l'inférence floue,

- l'agrégation des règles...

3.2.7 Implication floue

Soit la variable floue x de l'ensemble flou A défini sur l'univers de discours X . Et soit la variable floue y , appartenant à l'ensemble flou B défini sur l'univers de discours Y .

L'implication floue entre deux propositions élémentaires « x est A » et « x est B » défini par la règle R « si x est A **alors** y est B », est une proposition floue de la variable (x, y) , dont la valeur de vérité est donnée par la fonction d'appartenance μ_R :

$$\mu_R(x, y) = \phi(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3.13)$$

Pour une fonction ϕ de $[0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$

Plusieurs approches ont été adoptées pour la généralisation de l'implication floue [42]. Traditionnellement en commande floue, la règle R est modélisée en lui attribuant la sémantique « si x est A **et** y est B », ce ci revient à représenter la règle par une t-norme triangulaire telle que :

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad \text{Mamdani} \quad (3.14)$$

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \times \mu_B(y) \quad \text{Larsen} \quad (3.15)$$

3.2.8 Inférence

Puisque notre étude s'étalera sur la commande floue où l'observation est généralement précise et spécifique, et que l'opérateur du modus ponens généralisé ne joue aucun rôle dans ce cas [42], nous préférons de ne pas rentrer dans les détails de ce dernier.

3.2.8.1 Description des règles d'inférences

Les règles d'inférences peuvent être exprimées de différentes façons, à savoir par descriptions linguistiques et symboliques, ainsi que par matrice et tableaux d'inférence [43]. La description de ces règles par matrice est généralement la plus utilisée, pour sa simplicité, ainsi elle présente une facilitée d'établissement des inférences. Il arrive que toutes les cases du tableau ne soient pas complètes, on parle alors des règles d'inférences incomplètes.

3.2.8.2 Calcul des inférences

Afin de mettre en évidence le traitement des inférences, nous citons les plus connues.

a Méthode d'inférence Max-min (ou de Mamdani)

Cette méthode est la première à être proposée. Elle est très simple à mettre en place. L'opérateur « ET » est réalisé par la fonction « Min », l'opérateur de conclusion de chaque règle « Alors » par la fonction « Min » et l'opérateur de liaison « Ou » par la fonction « Max ».

Comme exemple pour les fonctions d'appartenance, nous présentons les variations de la température d'un moteur [45], avec les ensembles flous « élevé », « moyen » et « faible ».

La figure (3.3) montre un exemple de représentation graphique de cette méthode. La température est « élevée » avec un degré d'appartenance de 0.7, et « moyenne » avec un degré de 0.3. La vitesse est « faible » avec un degré d'appartenance de 1[45].

L'application de chaque règle, revient à la réalisation de la première étape décrite au paragraphe précédent où l'ensemble flou résultant de la première règle est décrit par : $\forall u \in U \mu_G(u) = \min(\min(0.7, 0.3), \mu_G(u))$. Avec la deuxième règle, on procède de la même façon. La synthèse des ensembles flous résultants de chaque règle, revient au maximum de tous ces ensembles [45].

b Méthode d'inférence Max-prod

La différence de cette méthode par rapport à la précédente réside au fait, que l'opérateur de conclusion 'Alors' est réalisé par la fonction arithmétique 'produit'. Dans ce cas l'ensemble flou résultant de la première règle, est décrit par : $\forall u \in U \mu_G(u) = \min(\mu_E(T_1), \mu_F(V_1)) \times \mu_G(u)$.

c Méthode d'inférence Somme-prod

Dans cette méthode, l'opérateur « ET », ainsi que l'opérateur de conclusion de chaque règle « Alors » sont réalisés par la fonction « produit » et l'opérateur de liaison « Ou » par la moyenne des ensembles flous résultants de chaque règle.

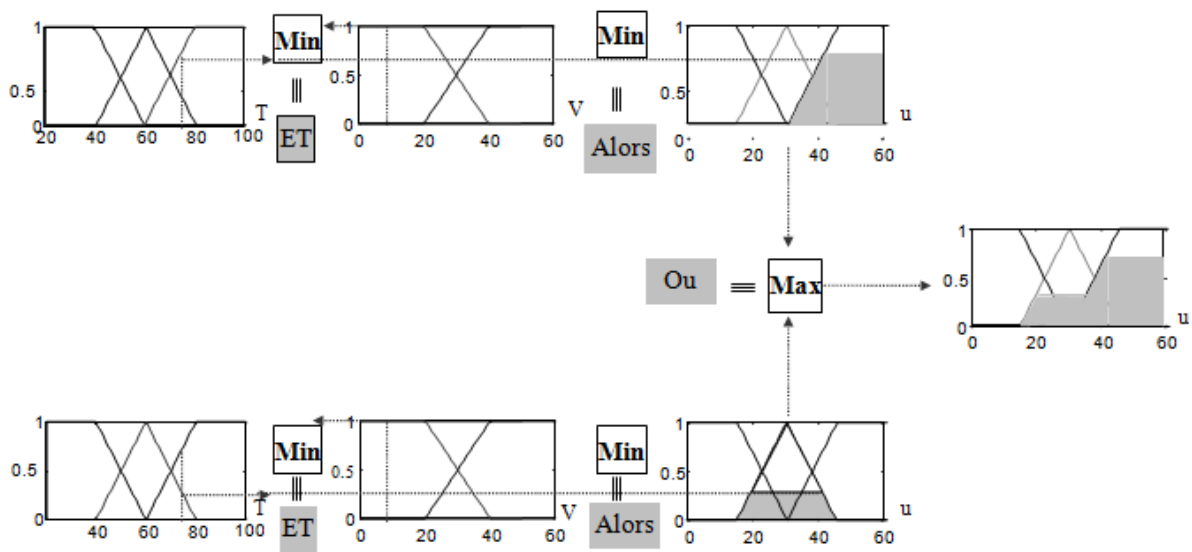


Figure 3.3. Exemple de la méthode d'inférence Max-min [45].

Des études comparatives ont été effectuées par [43], montrent que, le choix de la méthode n'influe pas sur les résultats, Néanmoins, la méthode Max-min est la plus utilisée à cause de sa simplicité.

3.2.9 Méthode de Takagi-Sugeno

Cette méthode apparue en 1983, est une approche complémentaire différente de celle déjà étudié, du fait que la conclusion des règles est supposée être une fonction des descriptions des variables d'entrées et les règles sont de la forme [42, 41]:

$$R1 : \quad \text{Si } T \text{ est } E \text{ et } V \text{ est } F \text{ Alors } u_1 = f_1(T, V) \quad (3.16)$$

$$R2 : \quad \text{Si } T \text{ est } M \text{ et } V \text{ est } F \text{ Alors } u_2 = f_2(T, V) \quad (3.17)$$

Les fonctions f_1, f_2, \dots sont généralement linéaires et quelquefois constantes. L'action non floue déduite de l'utilisation de ces règles est alors obtenue par interpolation figure (3.4) :

$$U = \alpha_1 f_1(T_1, V_1) + \alpha_2 f_2(T_1, V_1) / (\alpha_1 + \alpha_2) \quad (3.18)$$

$$\text{Avec :} \quad \alpha_1 = \min(\mu_E(T_1), \mu_F(V_1)), \alpha_2 = \min(\mu_M(T_1), \mu_F(V_1)) \quad (3.19)$$

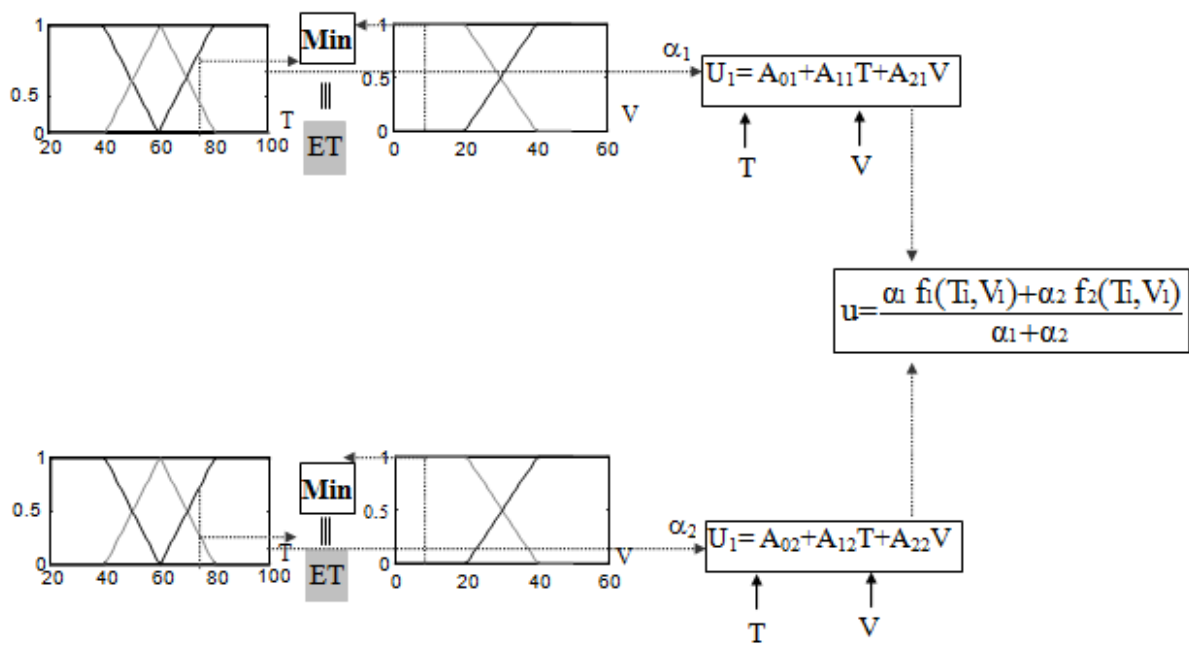


Figure 3.4. Exemple de la méthode de Takagi-Sugeno [45].

3.3 Commande à logique floue

Dans le domaine de la commande, la première application de la logique floue a été réalisée par Mamdani en 1974. En 1987 les Japonais ont mis en œuvre la première application utilisant le principe de la logique floue dans le métro de Sendai, et depuis l'utilisation de techniques de commande floue ne cesse d'accroître.

A l'instar d'un régulateur traditionnel, un régulateur flou convertit des grandeurs d'entrée en grandeurs de sortie qui agissent ensuite sur le processus ou le système réglé, plusieurs grandeurs d'entrée et de sortie sont reliées les unes aux autres de sorte que des systèmes complexes peuvent être réglés facilement, Mais on se rend vite compte que cette technique exige aussi une connaissance approfondie de l'installation à régler, ainsi qu'une robuste expérience professionnelle.

Après avoir énoncé les concepts de base et les termes linguistiques utilisés en logique floue, nous présentons la structure d'un contrôleur flou.

3.3.1 Configuration générale d'un régulateur flou

Un contrôleur flou sous sa forme générale remplace le contrôleur classique dans une boucle de réglage, il est considéré comme étant un système expert .Ce contrôleur est constitué de quatre blocs principaux (figure 3.5) :

- Un module d'interface avec le flou (ou fuzzification), qui effectue la conversion de l'entrée numérique observé en grandeur floue.
- Une base de connaissances floue. contenant les termes utiliser ainsi que les règles d'inférences.
- Un module d'interface non flou (défuzzification).Permettant la transformation floue en une information déterminée
- Un module de raisonnement flou (moteur d'inférence).

Chacun de ces blocs fera l'objet d'un développement détaillé.

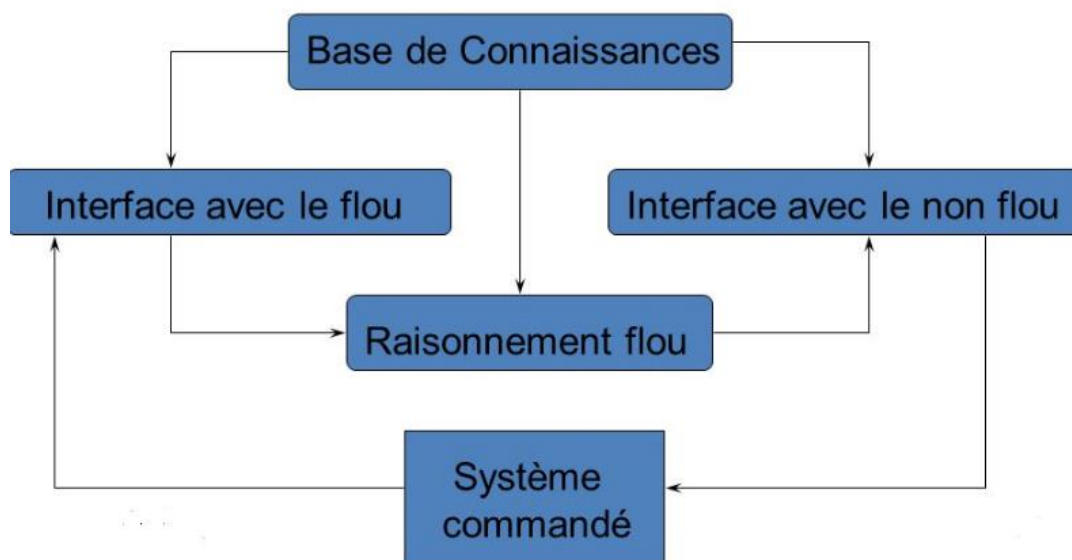


Figure 3.5. Organisation fonctionnelle d'un régulateur flou.

Le schéma de base d'un contrôleur flou repose sur la structure d'un régulateur classique à la différence que l'on va retenir la forme incrémentale. Cette dernière donne en sortie, non pas la grandeur de commande à appliquer au processus mais plutôt l'incrément de cette grandeur.

3.3.2 Fuzzification

La fuzzification proprement dite, consiste à transformer les variables réelles d'entrées en variables linguistiques, avec au préalable une normalisation. Cette transformation est obtenue en construisant des fonctions d'appartenances pour chaque variable d'entrée. Cependant, selon la finesse désirée pour spécifier les règles, nous sommes amenés à considérer plus ou moins de valeurs linguistiques [34, 43, 46], sachant qu'une subdivision très fine de l'univers de discours, de plus de sept ensembles flous n'apporte aucune amélioration du comportement du système à régler [43].

Pour le choix de la forme des fonctions d'appartenances caractérisant les variables linguistiques, il est préférable d'utiliser des fonctions d'appartenances quasi linéaires du fait qu'elles sont simples à réaliser [34, 43]. Nous utilisons dans ce cas, des fonctions de formes triangulaires et trapézoïdales. Ces fonctions sont choisies de façon symétrique, du fait que l'erreur et sa dérivée peuvent prendre aussi bien des valeurs positives que négatives.

Pour le choix de la répartition des fonctions d'appartenances, nous prenons en considération les remarques suivantes :

- La somme des fonctions d'appartenance à une variable x , doit satisfaire la relation suivante [47] :

$$\sum_{i=1}^{N_n} \mu_i^n(x^n) = 1 \quad (3.20)$$

Avec : x^n représente la variable physique (e ou Δe), N_k représente le nombre des fonctions d'appartenances de la variable k .

- Sur la base de l'étude menée par [43], la caractéristique de la variable de sortie du régulateur, présente dans un certain domaine une allure horizontale s'il n'y a pas de recouvrement d'au moins deux fonctions d'appartenance. Le même effet est obtenu

lorsque deux fonctions d'appartenance se recouvrent avec un degré d'appartenance égale à 1

- De ces faits, Les fonctions d'appartenance sont choisies équidistantes, de telle sorte que le recouvrement de deux fonctions d'appartenance voisines est égal à 1, c'est à dire que leurs croisements s'effectue à $\mu_i = \mu_{i+1} = 0.5$ (voir figure 3.6).
- D'autre part, la fuzzification de la variable de sortie Δu_n est effectuée de telle sorte que les fonctions d'appartenance prennent une forme triangulaire, symétrique et de même largeur.

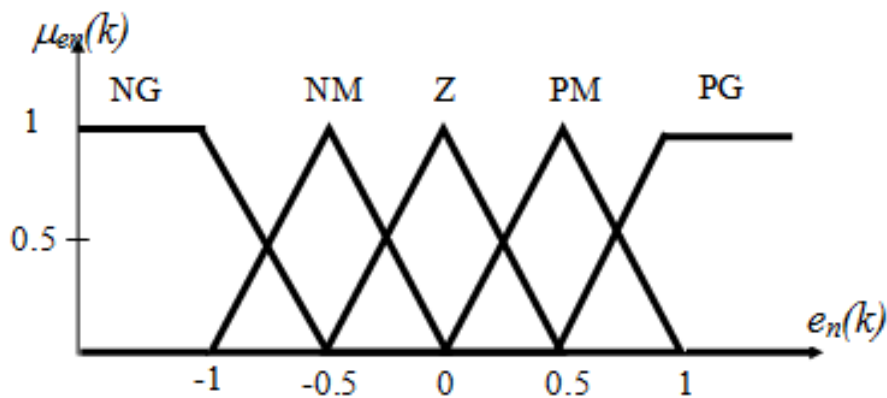


Figure 3.6. Forme de fonctions d'appartenance pour l'erreur normalisée.

3.3.3 Inférences

Après fuzzification, une deuxième étape très importante doit être effectuée. Cette étape consiste à déterminer les règles d'inférence qui spécifient comment calculer la valeur linguistique de la variation d'action $\Delta u_n(k)$, en fonction des valeurs linguistiques d'entrées $e_n(k)$, $\Delta e_n(k)$.

Pour construire la matrice d'inférence une analyse quantitative du processus doit être effectuée. Cette analyse repose sur une analyse dans le plan de phase de la trajectoire de la référence (que l'on souhaite donner au système) [34].

La figure 3.7 représente la trajectoire dans le plan de phase de la variation de l'erreur en fonction de l'erreur, ainsi que l'effet de l'action de commande sur le système. Cependant, une action dans un sens ou dans l'autre provoque le déplacement de la trajectoire dans les

directions indiquées par les flèches. Nous avons mentionné avec flèches rouges les directions conduisant à une convergence, et en pointillés celles qui conduisent à une divergence.

Sur la base de ces connaissances, les spécialistes ont élaboré les différentes règles d'inférences, pour obtenir les meilleures performances. La matrice d'inférence proposée par MacVicar-Whelan est l'une des meilleurs exemples des modèles de bases [41]. Elle a été développée afin de compléter celle proposée par Mamdani. Cette matrice est basée sur l'analyse dans le plan de phase, ainsi que sur les trois règles principales suivantes :

- Si l'erreur est zéro et sa dérivée est zéro, alors, garder le présent cadre de commande
- Si l'erreur tend vers zéro avec un taux satisfaisant, alors garder le présent cadre de commande
- Si l'erreur n'est pas autocorrective, alors l'action de commande n'est pas zéro et elle dépend du signe et d'amplitude de $e(k)$ et $\Delta e(k)$.

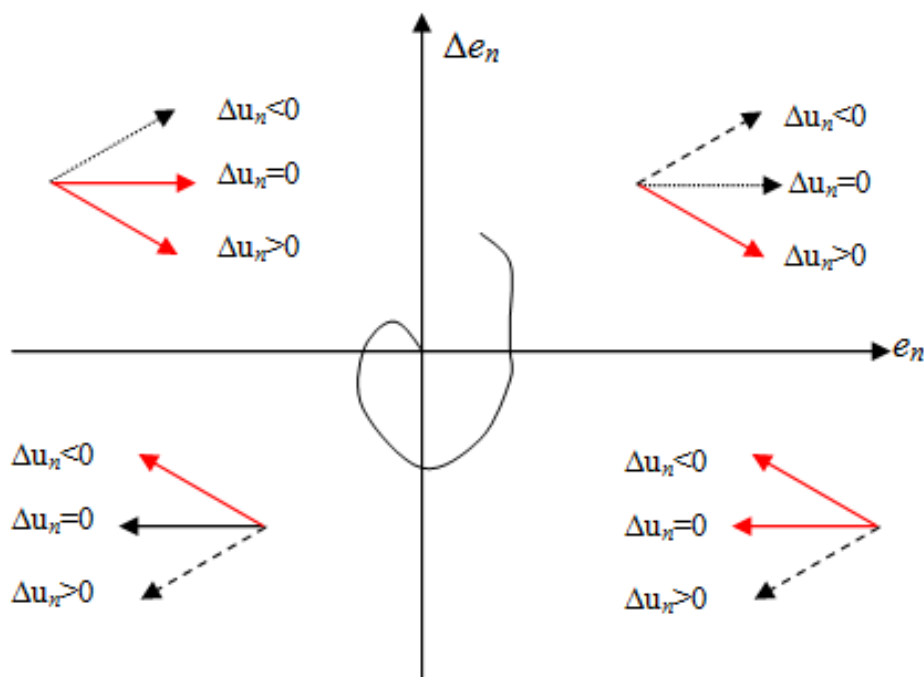


Figure 3.7. Trajectoire dans le plan de phase [45].

$\Delta u(k)$		$\Delta e(k)$							
		NG	NM	NP	NZ	PZ	PP	PM	PG
$e(k)$	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	NZ
	NM	NG	NG	NM	NM	NM	NP	NZ	PP
	NP	NG	NM	NP	NP	NP	NZ	PP	PM
	NZ	NM	NM	NP	NZ	PZ	PP	PM	PM
	PZ	NM	NM	NP	NZ	PZ	PP	PM	PM
	PP	NM	NP	PZ	PP	PP	PP	PM	PG
	PM	NP	PZ	PP	PM	PM	PM	PG	PG
	PG	PZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG	PG

Zone 4
Zone 1

Zone 2
Zone 5
Zone 3

Tableau 3.1. Zones homogènes principales dans la matrice de MacVicar-Whelan [45].

Le tableau.3.1 présente la matrice d'inférence proposée par MacVicar-Whelan, les matrices d'inférences les plus connues appliquées au régulateur par logique floue, peuvent être obtenues à partir de cette matrice. Dans ce cas l'univers de discours définissant l'erreur, sa dérivée et l'action de commande sont réparties sur huit sous-ensembles flous. Sur cette matrice, nous pouvons identifier cinq zones différentes. Les règles de la zone 1 et 2, caractérisent le cas où $e(k)$ et $\Delta e(k)$ sont de signes opposés (quadrant 2 et 4 voir figure 3.7), les règles de la zone 3 et 4 caractérisent le cas où $e(k)$ et $\Delta e(k)$ sont de mêmes signes (quadrant 1 et 3), les règles de la zone 5 caractérisent le cas où l'amplitude de l'erreur et de sa dérivée est relativement petite.

Après avoir déterminé les règles d'inférences, nous devons effectuer une interprétation mathématiquement. Comme on la déjà constaté, plusieurs méthodes ont été adoptées pour l'agrégation des règles d'inférences, ce qui donne par conséquent, différentes manières de réaliser les régulateurs flous. Les plus connus sont ceux de Mamdani et de Sugeno. La méthode de Mamdani ayant comme conclusion symbolique (floue), présente l'inconvénient d'avoir la

nécessité de passer par l'étape de défuzzification pour obtenir la valeur réelle de la commande, et l'avantage d'être intuitive et bien adaptée au raisonnement humain. La méthode de Sugeno présente l'avantage d'être bien adaptée aux systèmes linéaires et aux systèmes dont la dynamique est bien connue. Comme elle garantit une continuité de la surface de la production [43], d'autre part, elle présente l'inconvénient d'avoir recours à une analyse mathématique.

Ceci nous conduit à utiliser la méthode de Mamdani permettant une vérification directe des conséquences des règles d'inférences. Si par exemple, la sortie est caractérisée par l'apparition de plus d'un maximum, cela révèle l'existence d'au moins deux règles contradictoires (voir figure 3.8). Ou si on se retrouve avec une grande zone plate, cela révèle que les règles, dans leur ensemble, sont malles formulées (voir figure 3.9) [34].

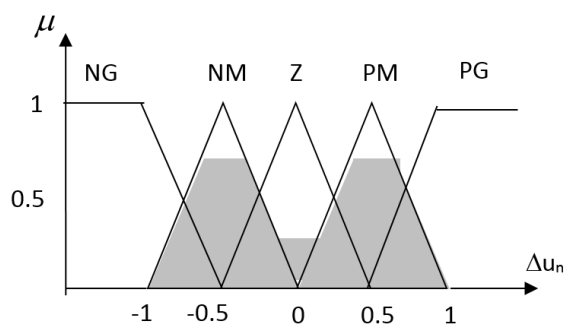


Figure 3.8. Cas de deux règles contradictoires.

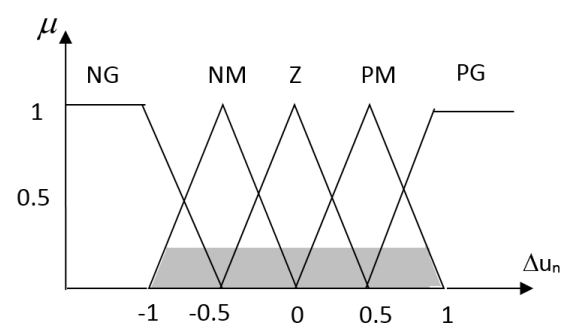


Figure 3.9. Cas de règles malles formulées.

3.3.4 Défuzzification

Enfin, la dernière étape du régulateur flou est la conversion de la grandeur linguistique Δu_n résultante de l'agrégation, en grandeur de commande précise. Plusieurs approches existent pour réaliser cette conversion [34, 47, 41]. Les plus utilisées sont la méthode du centre de gravité, la méthode des hauteurs pondérées et la méthode de la moyenne des maximums.

a Méthode du centre de gravité

Cette méthode (COG en anglais) est la plus utilisée, elle est considérée comme la méthode la plus précise. La grandeur de sortie du régulateur correspond l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante μ_{res} .

$$\Delta u_n(k) = \frac{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} x \mu_{res}(x) dx}{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} \mu_{res}(x) dx} \quad (3.21)$$

b Méthode des hauteurs pondérées

Cette méthode n'est qu'un cas particulier de la méthode précédente, elle est utilisée dans le cas où les fonctions d'appartenances de la variable de sortie ne recouvrent pas.

$$\Delta u_n(k) = \frac{\sum_{i=1}^n x \mu_{ri}(x)}{\sum_{i=1}^n \mu_{ri}(x)} \quad (3.22)$$

Où, n représente le nombre de sous-ensembles flous de la variable de sortie (voir figure 3.10).

c Méthode de la moyenne des maximums

Cette méthode est très simple. La valeur numérique de la grandeur de sortie est égale à la moyenne des abscisses des valeurs maximales de la fonction d'appartenance résultante.

$$(3.23)$$

Où, g est l'ensemble des valeurs maximales et m représente le cardinal de g.

L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le cas du changement de la dominance d'une fonction d'appartenance à une autre. Effectivement ce changement

s'accompagne par un saut brusque de la grandeur de sortie. $\Delta u_n(k) = \frac{1}{m} \sum_{x_i \in g} x_i$

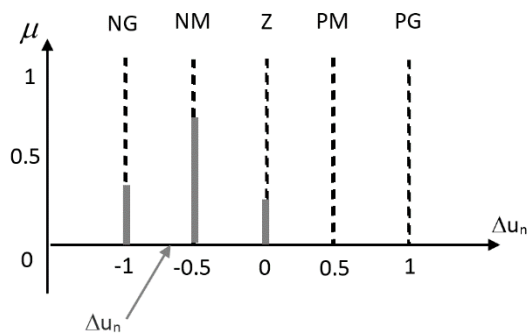


Figure 3.10. Défuzzification par la méthode des hauteurs pondérées.

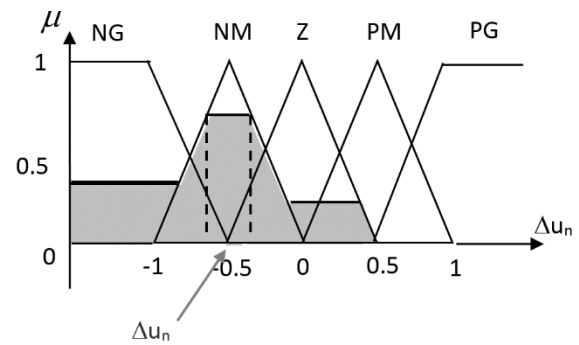


Figure 3.11. Défuzzification par méthode de la moyenne des maximums.

3.4 MPPT à base de logique floue

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs [49]. L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. La logique floue est une des méthodes de contrôle les plus puissants. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

Cette fonctionnalité du contrôleur flou démontre son efficacité et le rend parmi les meilleurs dispositifs de suivi PPM.

Le contrôleur de flou MPPT proposée comporte deux variables entrées et une sortie voir figure 3.12. Les deux entrées sont l'erreur E, et la variation d'erreur CE et une variable de sortie ΔD (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée [50].

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes

$$E(j) = \frac{P_{pv}(j) - P_{pv}(j-1)}{V_{pv}(j) - V_{pv}(j-1)} \quad (3.24)$$

$$\Delta E(j) = E(j) - E(j-1) \quad (3.25)$$

$P_{pv}(j)$ et $V_{pv}(j)$ sont respectivement : la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

A partir de l'entrée $E(j)$ on peut savoir la position du point de fonctionnement pour la charge à l'instant j par rapport au point de puissance maximale.

La valeur de l'entrée $CE(j)$ exprime la direction de déplacement de ce point.

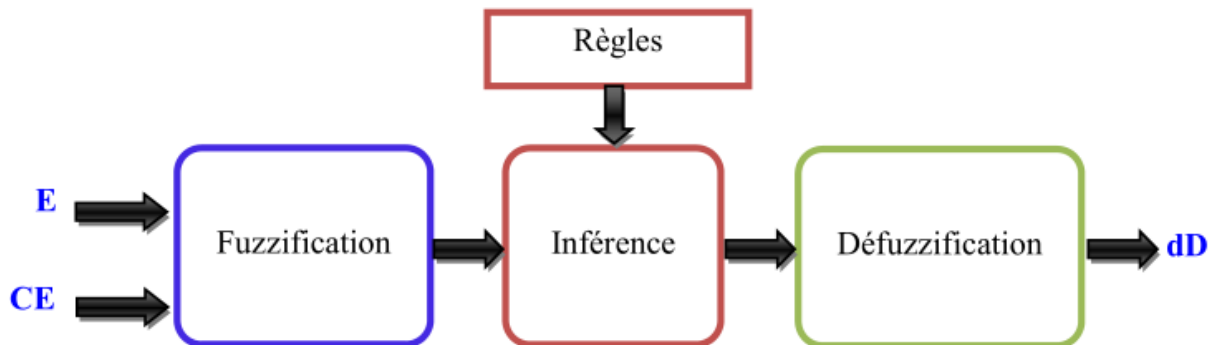


Figure 3.12. Schéma de l'algorithme classique MPPT flou.

3.5 Conclusion

La logique floue s'est imposé dans divers domaine notamment celui de l'électronique, du contrôle et de l'automatisation, en effet elle permet la modélisation et le traitement rigoureux d'informations imprécises, incertaines et subjectives, et donc une théorie tout à fait adaptée au problème de l'optimisation que nous sommes en train de traiter ici. Dans ce chapitre nous nous somme intéressé aux concepts de la commande en logique flou à fin de comprendre et concevoir un contrôleur MPPT flou dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 Modélisation et Simulation

4.1 Introduction

Le sujet de la commande "MPPT" dans le domaine du solaire photovoltaïque est en général abordé en deux volets différents : le premier concerne l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale, dont le choix va se répercuter sur la précision et la vitesse de suivi, ainsi que les oscillations autour de la puissance de crête. Et le second se réfère au convertisseur DC/DC, qui permet l'obtention d'un module d'interface adapté pour fonctionner en tant qu'une partie de puissance du contrôleur MPPT considéré.

Ce chapitre est consacré à une étude comparative permettant d'évaluer le comportement de la puissance d'un système photovoltaïque composée d'un panneau solaire, un étage d'adaptation, et une commande MPPT. Cette comparaison sera effectuée entre trois algorithmes de cette commande qui servent à la recherche du point de puissance maximale dans un système photovoltaïque, ces trois algorithmes sont :

L'algorithme P&O, Hill Climbing, et la logique floue, qui ont été théoriquement définis dans les chapitres précédents.

L'objet de notre travail est la simulation d'une installation photovoltaïque dans l'environnement Matlab/Simulink. On va s'intéresser au comportement de la puissance délivrée par ce système solaire et à l'efficacité de l'étage d'adaptation avec les différentes approches qui seront utilisées. Des résultats de simulation de cette opération d'optimisation seront présentés et analysés à la fin de ce chapitre.

4.2 Module solaire PV

Dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque en dénombre plusieurs types de panneaux, parmi eux nous avons choisis celui de KYOCERA KD210GH-2PU, nous avons effectué notre étude aux termes de l'irradiation et de la température convenu aux conditions international ; ces conditions sont mentionné avec les caractéristiques du panneau dans le (tableau 4.1.). Ces données sont utilisées pour mesurer les caractéristiques des panneaux photovoltaïques.

KYOCERA KD210GH-2PU	
Puissance Maximale (P_{MAX})	210W (+5%/-5%)
Tension Maximale (V_{MPP})	26.6V
Courant Maximale (I_{MPP})	7.90A
Tension de circuit ouvert (V_{OC})	33.2V
Courant de circuit ouvert (I_{SC})	8.58A
Nombre de cellule	54 Cellules
Voltage Maximum du système	600V
Coefficient de température de (V_{OC})	-1.2V/°C
Coefficient de température de (I_{SC})	5.02x10-3A/°C
Irradiation	1000W/m2
Température de la cellule	25°C

Tableau 4.1. Caractéristiques électrique du panneau KYOCERA KD210GH.

Pour modéliser notre module PV sur Matlab, nous avons connecté 54 cellules PV obtenues depuis la bibliothèque Simscape en série comme il est représenté dans la figure 4.1.

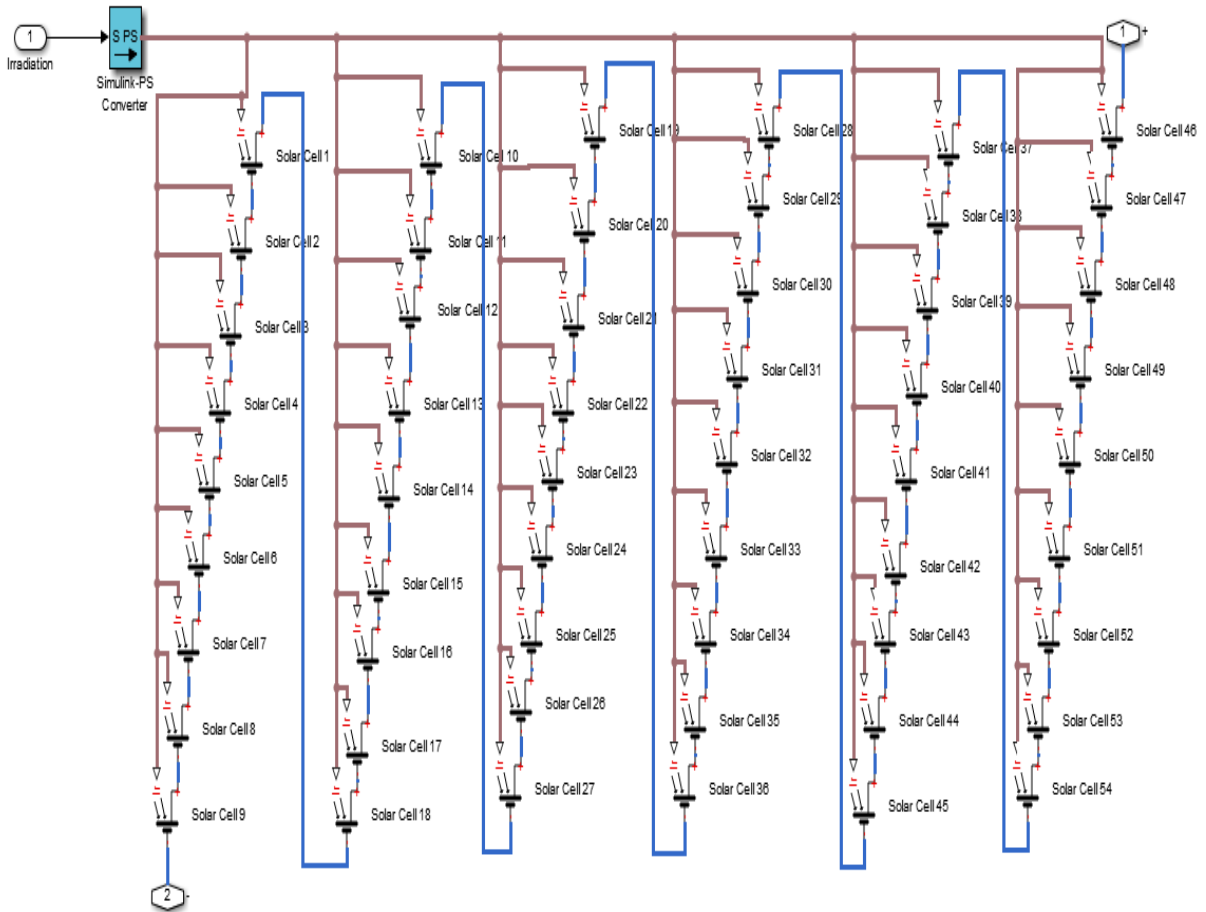


Figure 4.1. Circuit équivalent du module PV KD210GH-2PU.

Cette connexion de cellules a été regroupée dans un seul bloc qui représente le module PV. Les caractéristiques du panneau ont été bien introduites dans le système et ils ont été spécifiés dans le bloc paramètre comme il est illustré dans la figure 4.2.

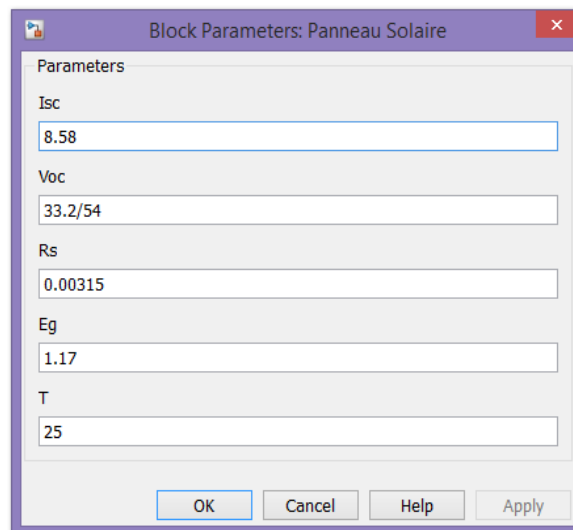


Figure 4.2. Bloc des caractéristiques du module PV KD210GH-2PU.

4.3 Connexion directe « GPV-Charge »

La connexion directe du panneau photovoltaïque à une charge est le principe de fonctionnement le plus simple, le moins cher et le plus répandu, voir (Figure 4.3). ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très haut degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, et du faible coût [53].

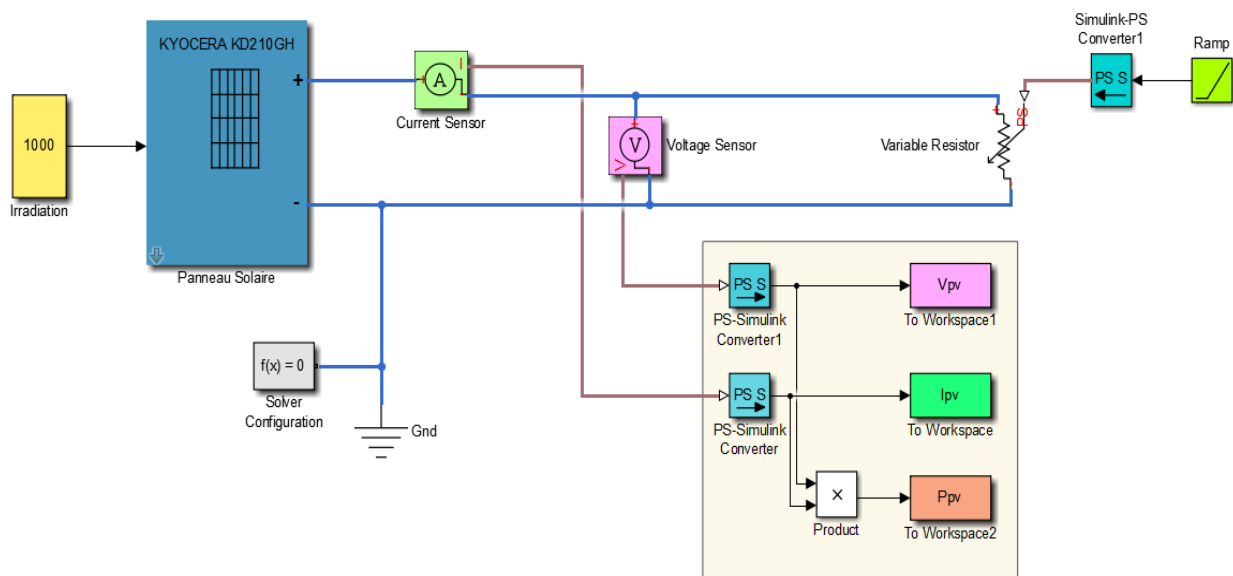


Figure 4.3. Système solaire simple.

Cette connexion se plaint de plusieurs inconvénient, le plus dominant entre eux est l'influence directe de la valeur de la charge sur la puissance fournie par le générateur. En fait, la puissance fournit par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement du système, ce point là, résulte de l'intersection entre la caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ du (GPV) et celle de la charge. Et donc, la puissance transmise directement à la charge DC, n'est toujours pas affectée à la puissance maximale P_{MAX} (PPM = point de puissance maximale) que peut fournir le panneau solaire sous certaines conditions. La figure 4.4 montre ce cas particulier.

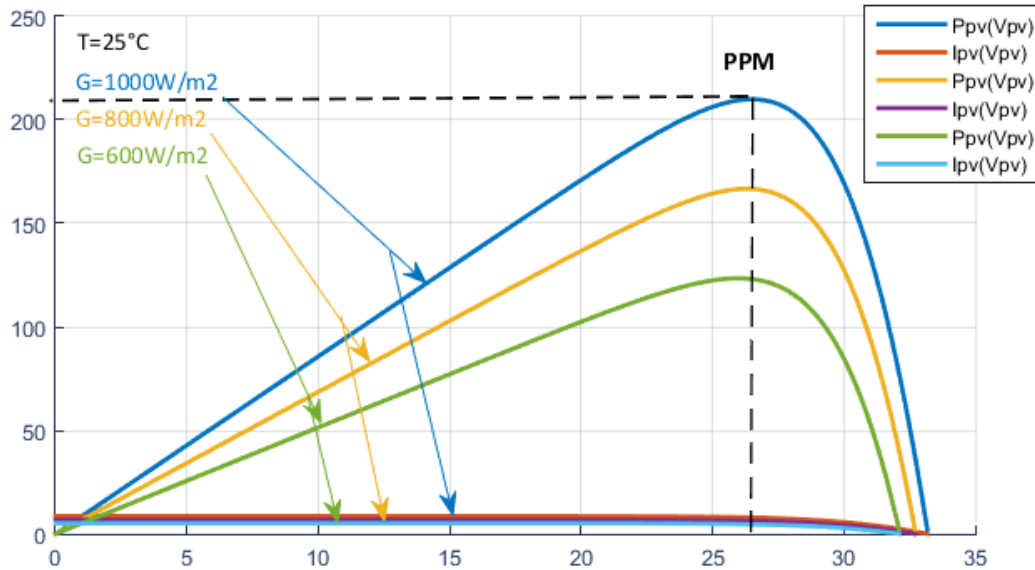


Figure 4.4. Les caractéristiques du PV connecté directement à une charge.

Quand on a simulé notre système solaire sous différentes intensités d'irradiations, nous avons remarqué que la puissance du GPV ne stabilise pas dans une seule valeur quel que soit l'intensité de cette irradiation. La puissance du GPV atteint sa valeur maximale 210W dans un seul point « PPM » quand $G=1000\text{W/m}^2$, puis elle s'écroule fortement jusqu'à qu'elle s'annule. Nous remarquons aussi que tous les PPMs atteints sous les différentes valeurs de l'irradiation, ont la même valeur de tension V_{pv} .

L'inconvénient majeur de cette connexion et que la puissance transmise directement à la charge DC, n'est toujours pas effectuée à la puissance maximale PPM que peut fournir le panneau PV sous certaines conditions, donc elle n'est pas suffisante.

4.4 Connection Indirect « GPV-Convertisseur-Charge »

Nous avons déjà vu que pour une charge DC donnée, les variations des conditions climatiques extérieures sur le module PV provoquent une variation du point de fonctionnement du système ce qui conduira à une réduction importante de la puissance électrique délivrée à la charge et donc à une diminution du rendement global du système.

Pour limiter cette diminution nous avons ajouté un étage d'adaptation entre le panneau PV et la charge, ce dernier est un convertisseur DC/DC que l'on a choisi de type élévateur « Boost » commandé par un algorithme de poursuite du PPM. Dans la figure 4.5, le rôle du convertisseur

DC/DC est d'ajuster les niveaux du courant et de Tension d'entrée (I_{pv} , V_{pv}) selon les consignes du signal externe de commande.

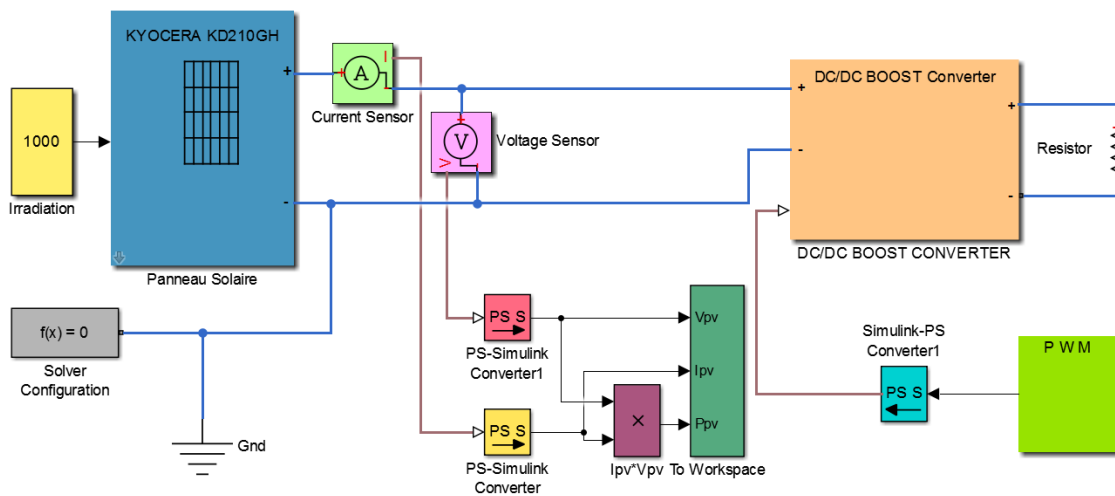


Figure 4.5. GPV avec un convertisseur DC/DC et une charge.

Le convertisseur DC/DC qu'on a choisi est composé d'une bobine, une diode, un condensateur, et un switch qui est commandé par un signal externe. La modélisation de notre convertisseur boost, est représentée dans la figure 4.6.

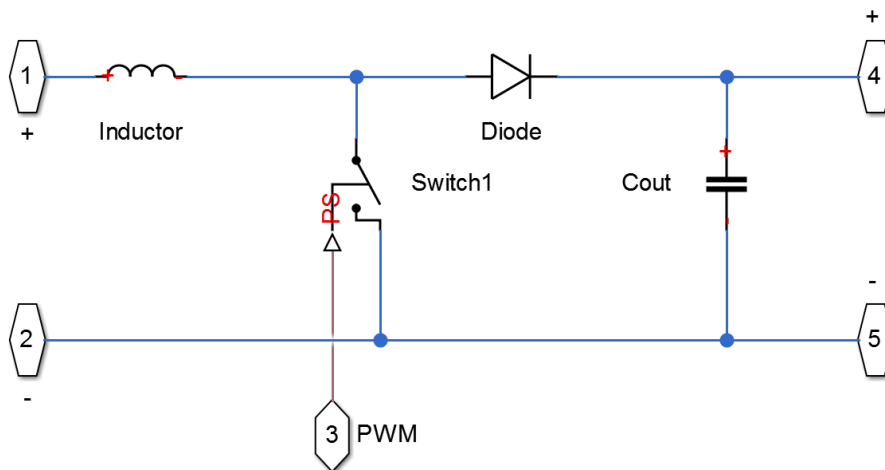


Figure 4.6. Modélisation d'un convertisseur DC/DC dans Matlab/Simulink.

Après la simulation de ce système solaire que nous avons lui ajouté un hacheur boost, nous avons obtenus le résultat illustré dans la figure 4.7.

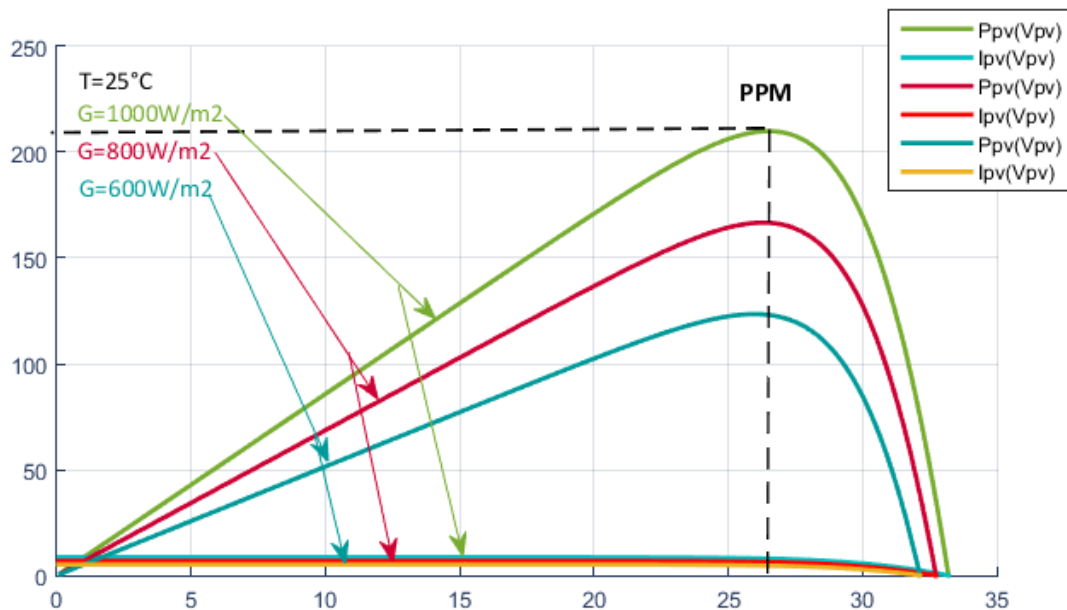


Figure 4.7. Les caractéristiques du PV connecté à un convertisseur DC/DC et une charge.

Selon les caractéristiques du panneau solaire photovoltaïque KYOCERA KD210GH qu'on a précédemment cité, nous avons calculé les composants du convertisseur DC/DC boost comme il est présenté par la suite.

4.4.1 Calcul des composants

a La charge DC

Dans le but de maintenir la tension de sortie V_{out} dans un état constant, la charge DC (la résistance R_L) qu'on a l'intention de connecter à la sortie du convertisseur doit être capable de consommer toute la puissance générée par le panneau photovoltaïque. Ceci est équivalent à dire que sa valeur (en Ohms) doit impérativement satisfaire l'inégalité suivante :

$$\frac{(V_{out})^2}{R_L} > P_{max} \quad (4.1)$$

Ce qui est équivalent à :

$$R_L < \frac{(V_{out})^2}{P_{max}} \quad (4.2)$$

Avec P_{max} : Puissance maximale que peut fournir le panneau photovoltaïque utilisé ≈ 210 W.

A travers cette dernière équation, on voit bien que pour déterminer R_L il faut tout d'abord fixer V_{out} , P_{max} étant une entité entièrement connue dans notre application. Mais selon l'équation (2.16), V_{out} dépend directement de la valeur du rapport cyclique du signal de commande et de V_{in} . Or dans les applications photovoltaïques, V_{in} varie énormément en fonction des conditions de quelques paramètres climatiques qui entourent l'installation, ce qui implique une variation correspondante du rapport cyclique D pour que la commande MPPT arrive à poursuivre les points de puissance maximales qui en résultent. D'ici, il apparaît nécessaire de faire une analyse préliminaire des caractéristiques des connexions électriques (GPV-Convertisseur-Charge) avant d'arriver à cerner sa plage de variation des variations possibles du rapport cyclique "D" et d'en déduire par la fin les valeurs admissibles de R_L .

$\Delta V_{in} = 1\% \times V_{in_max} = 0.332 \text{ V}$, (Ondulation sur la tension d'entrée).

$$V_{out} = [0, V_{out_max}] \quad (4.3)$$

$$D = [D_{min}, D_{max}] = [0, 0.4] \quad (4.4)$$

D'après l'équation (2.16), la variation de la tension de sortie est :

$$V_{out_min} = \frac{V_{in_min}}{1-D_{min}} = \frac{0}{1-0} = 0V \quad (4.5)$$

$$V_{out_max} = \frac{V_{in_max}}{1-D_{max}} = \frac{26.6}{1-0.4} = 44.33V \quad (4.6)$$

$$V_{out} = [V_{out_min}, V_{out_max}] \approx [0, 44.33V] \quad (4.7)$$

$$R_L < \frac{(44.33)^2}{210} \Rightarrow R_L < 9.35 \text{ Ohm} \quad (4.8)$$

Dimensionnement de l'inductance :

$$L \geq L_{min} = \frac{V_{pv} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (4.9)$$

$$L \geq L_{min} = \frac{33.2 \times \frac{1}{3}}{0.5 \times 40 \times 10^3} = 0.5 \text{ mH} \quad (4.10)$$

b Calcul de la valeur C_{out} du condensateur

$$C_{out} \geq \frac{D \cdot I_{out}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} \quad (4.11)$$

$$C_{out} \geq \frac{D \cdot (1-D) I_{in}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} \quad (4.12)$$

$$C_{out} \geq \frac{D \cdot (1-D) I_{pv_max}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} \quad (4.13)$$

D'après les données numériques du problème, nous avons :

$$D = 0.4, I_{pv_max} = 8.58 \text{ A} \quad \text{et} \quad \Delta V_{out} = 2V_{ce} \quad (4.14)$$

Ce qui donne :

$$C_{out} \geq \frac{0.4 \times (1-0.4) \times 8.58}{2 \times 40 \times 10^3}$$

$$C_{out} \geq 23.74 \mu\text{F}$$

4.5 Poursuite du PPM

Dans le but d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes de notre GPV donné, nous avons introduit au système précédant une commande MPPT comme il est illustré dans la figure 4.8.

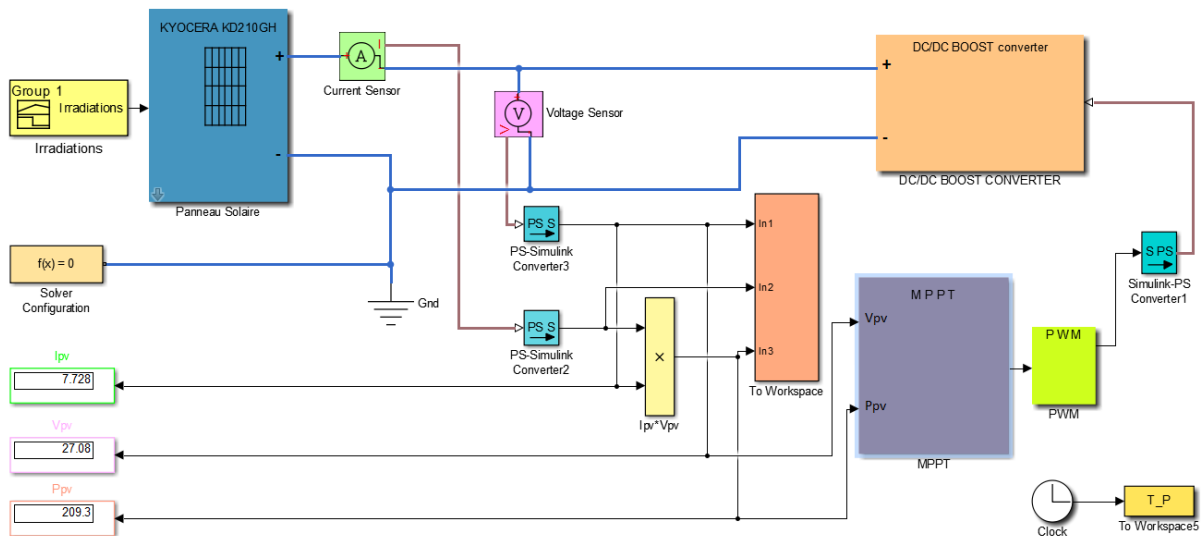


Figure 4.8. Modélisation du GPV avec une commande MPPT et un convertisseur DC/DC.

Nous avons vu lors du chapitre 2, le principe de fonctionnement d'une commande MPPT, et comme nous l'avons déjà mentionné, nous allons dans notre travail faire une comparaison entre trois approches.

4.5.1 Simulation du système solaire avec l'algorithme P&O

La première approche qu'on va étudier, est l'approche Perturber et Observer « P&O », montré dans la figure 4.9.

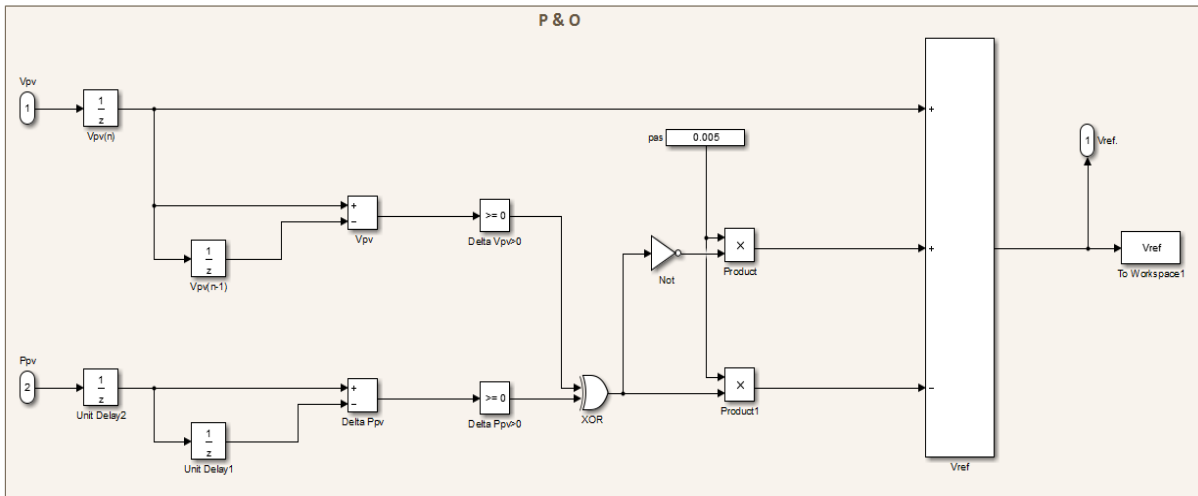


Figure 4.9. Modélisation de l'algorithme P&O dans Matlab/Simulink.

Le résultat qu'on a obtenu dans la simulation du système solaire, avec la commande P&O incluse, est représenté dans la figure 4.10.

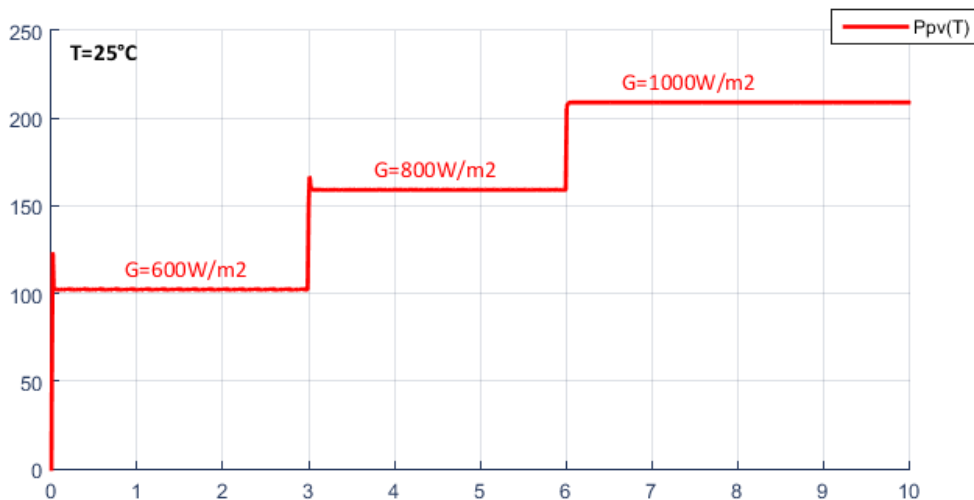


Figure 4.10. Puissance Ppv(T) atteinte avec la commande P&O.

Nous avons testé la commande P&O pour différents régimes de fonctionnement pour une température de $T=25^{\circ}\text{C}$ et trois niveaux de l'irradiation. Dans cette figure 4.10, on constate que la valeur de la puissance monte en escalier, en accord avec les variations de l'irradiation solaire jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur maximale souhaité ($P_{pv}=102.2\text{W}$, $P_{pv}=159.1\text{W}$ puis $P_{pv}=209\text{W}$) avec un temps de réponse de $t=0.015\text{s}$ et un dépassement de l'ordre de 123.5W , et 166.7W respectivement.

Sachant que le rendement exige : des pertes de conduction négligeables, de faibles pertes de commutation, une basse puissance de contrôle ainsi qu'une faible perte au niveau des composants passifs utilisés, nous proposons d'utiliser des méthodes plus performantes.

4.5.2 Simulation de l'algorithme Hill Climbing

La deuxième approche que nous allons étudier, est l'approche Hill Climbing, dont sa modélisation est illustré dans la figure suivante.

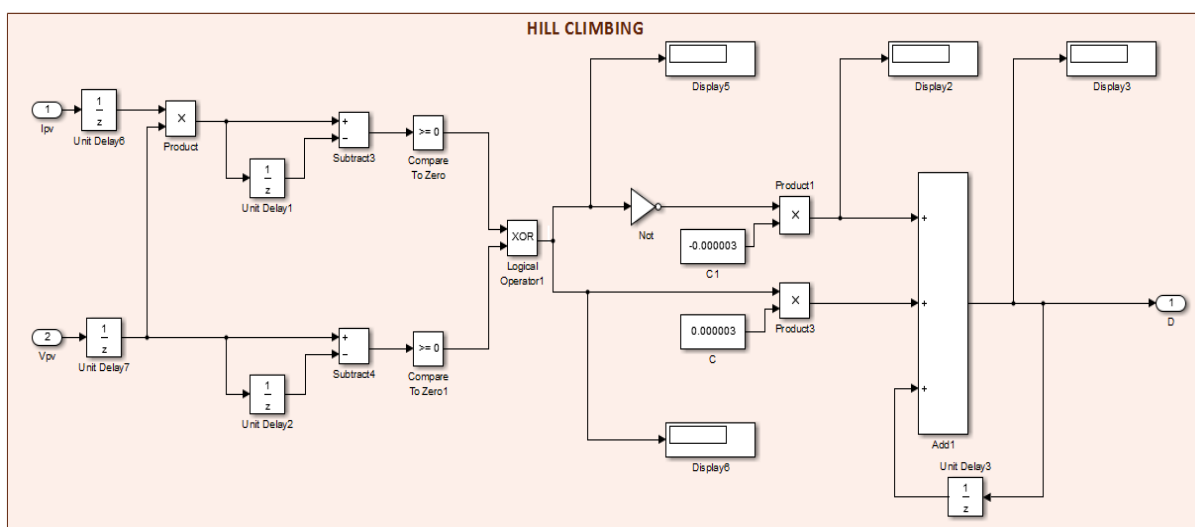


Figure 4.11. Modélisation de l'algorithme Hill Climbing.

Le résultat qu'on a obtenu dans la simulation du système solaire, avec la commande Hill Climbing, est représenté dans la figure 4.12.

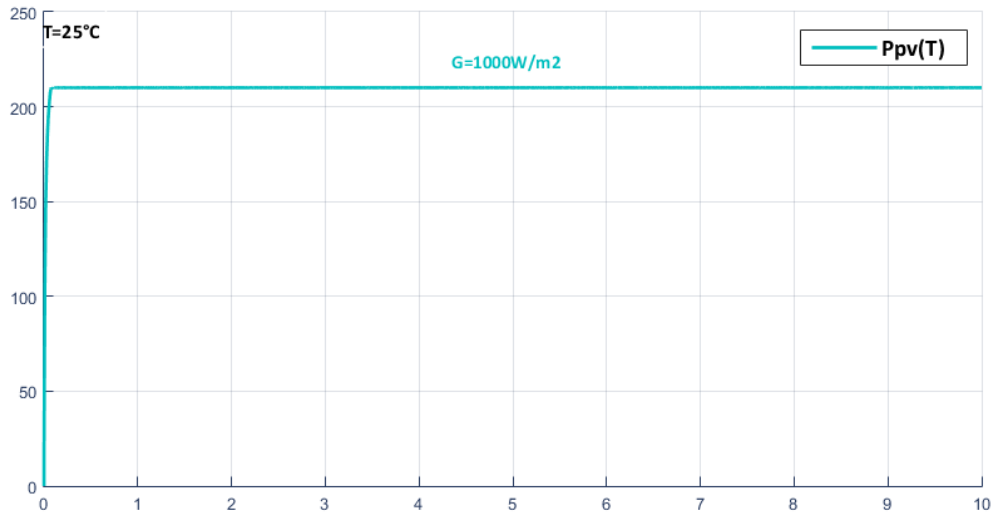


Figure 4.12. Puissance $P_{pv}(T)$ obtenu avec l’algorithme Hill Climbing.

Cette figure montre, que la poursuite du PPM a été effectuée sous des conditions atmosphériques constantes $G=1000W/m^2$ et $T=25°C$, après l’ajout de la commande Hill Climbing, la puissance délivrée par le panneau PV a été optimisée, et elle a pu se stabiliser après avoir atteint la valeur maximale $P_{pv}=210W$ souhaité, avec un temps de réponse minimal qui égale à 0.07s.

4.5.3 Simulation de l’algorithme HC basée sur la Logique Floue

Afin d’améliorer les performances de l’algorithme précédent, nous avons associé la logique floue à l’algorithme Hill Climbing.

Nous avons remplacé la dernière commande MPPT qui était basée sur l’algorithme Hill Climbing classique, par un nouveau bloc Fuzzy, comme il est représenté dans la figure 4.13.

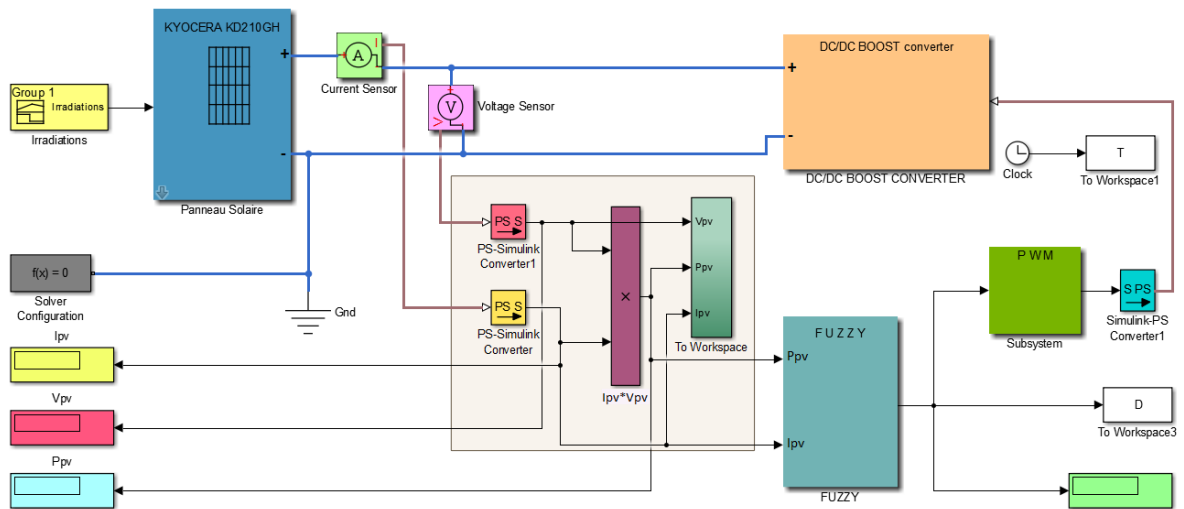


Figure 4.13. Modélisation du Fuzzy "Hill Climbing" dans Matlab/Simulink.

■ Conception du régulateur Flou

Pour la conception de l'algorithme Hill Climbing basée sur la logique Flou, nous avons ajouté la boîte à outils « Fuzzy Logic Controller » de Matlab. Cette boîte ajoute les composants nécessaires dans Simulink.

- Le système avec contrôleur flou devrait être le suivant :

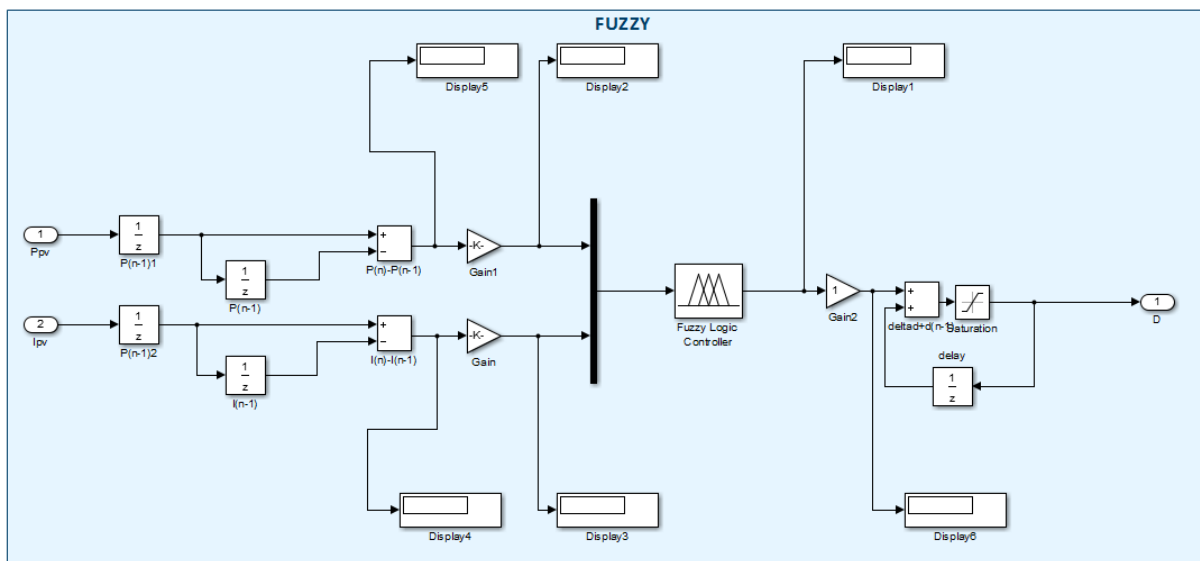


Figure 4.14. Modélisation de l'algorithme Hill Climbing basée sur la logique Floue.

Tous d'abord nous avons tapé « Fuzzy » à la ligne de commandes de Matlab, pour faire appel au bloc « Fuzzy Logic Designer », afin de créer la fuzzification des entrées ΔP et ΔI et celle de la sortie « ΔD » de l'algorithme adopté.

Les figures figure4.15, figure4.16 et figure4.17 donnent la répartition des fonctions d'appartenances utilisées.

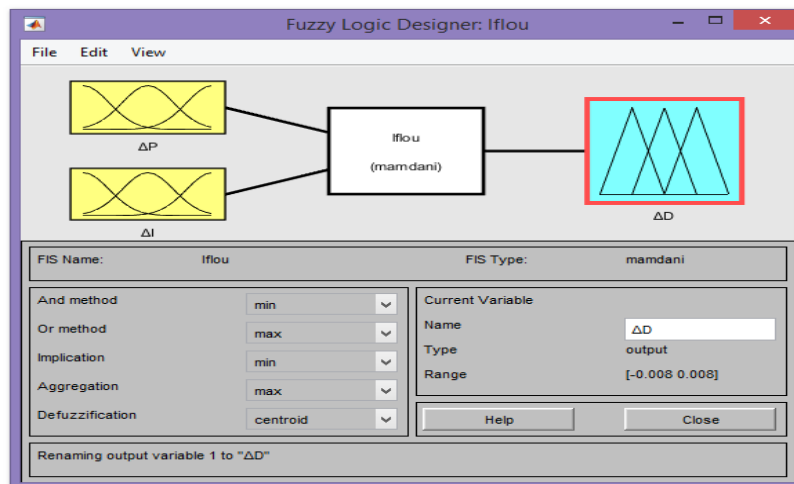


Figure 4.15. Bloc « FUZZY Logic Designer ».

Pour introduire le premier signal ΔP , nous avons introduit le nom, l'intervalle et les types des trois variables linguistique « Negative, Zero et Positive » du signal dans le bloc « Membership Function Editor », comme il est représenté si dessous.

Les trois signaux d'entrées, en était introduite de la même façon.

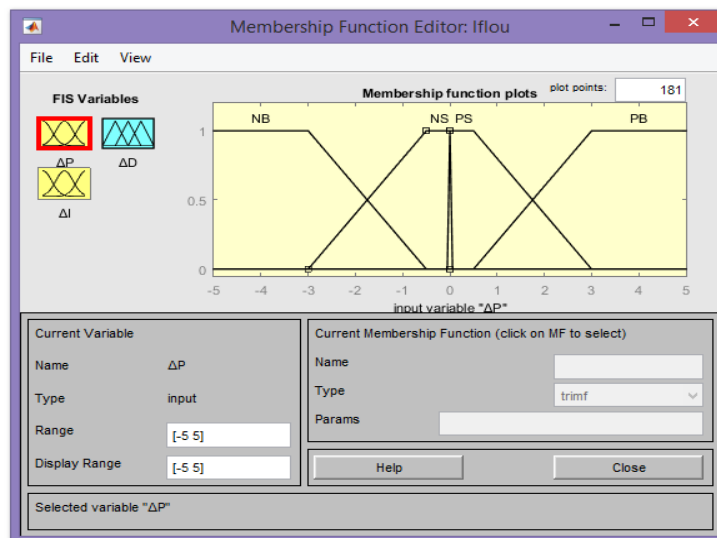


Figure 4.16. Établissement du signal d'entrée ΔP .

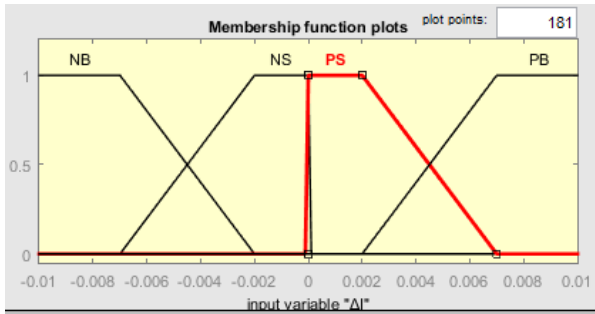


Figure 4.17. Signal d'entrée ΔI .

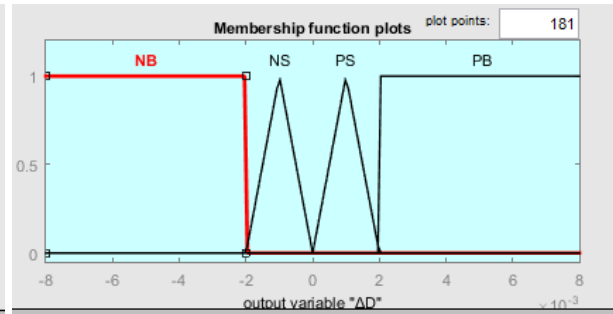


Figure 4.18. Signal d'entrée ΔD .

Le fonctionnement du Fuzzy dépend des règles introduites dans le bloc « Rules Editor », comme illustré dans la figure 4.19.

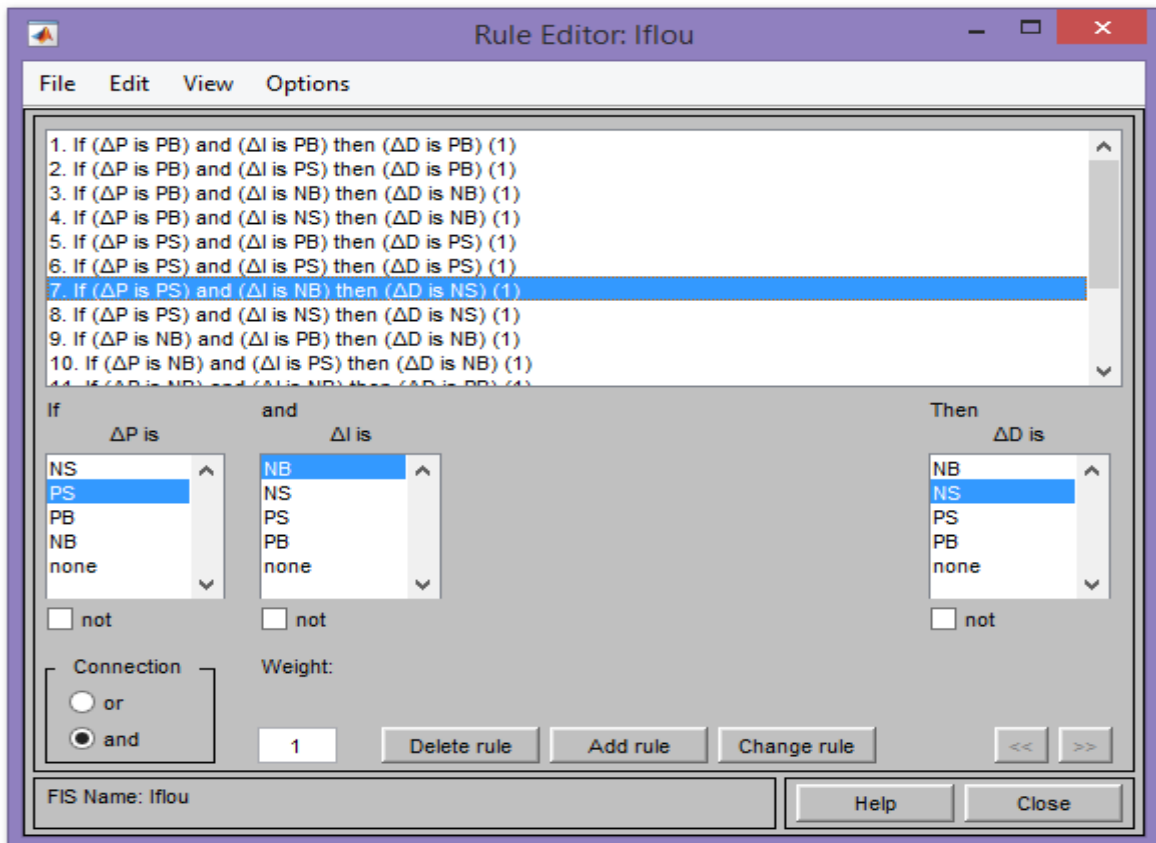


Figure 4.19. Bloc « Rule Editor ».

L'algorithme de règles floues est un ensemble de 16 règles de commande ; ces règles sont basées sur la réglementation de l'algorithme Hill-Climbing, et elles sont représentées dans le tableau 4.2.

$\Delta I \backslash \Delta P$	PB	PS	NB	NS
PB	PB	PS	NB	NS
PS	PB	PS	NB	NS
NB	NB	NS	PB	PS
NS	NB	NS	PB	PS

Tableau 4.2. L'algorithme de règles floues.

En fin nous avons sauvegardé notre Fuzzy Logic Designer dans l'espace de travail, pour effectuer la simulation du système solaire avec la nouvelle commande MPPT.

Le résultat qu'on a obtenu dans la simulation du système solaire, avec les commandes Hill Climbing basée sur la logique floue et P&O, est représenté dans la figure 4.13.

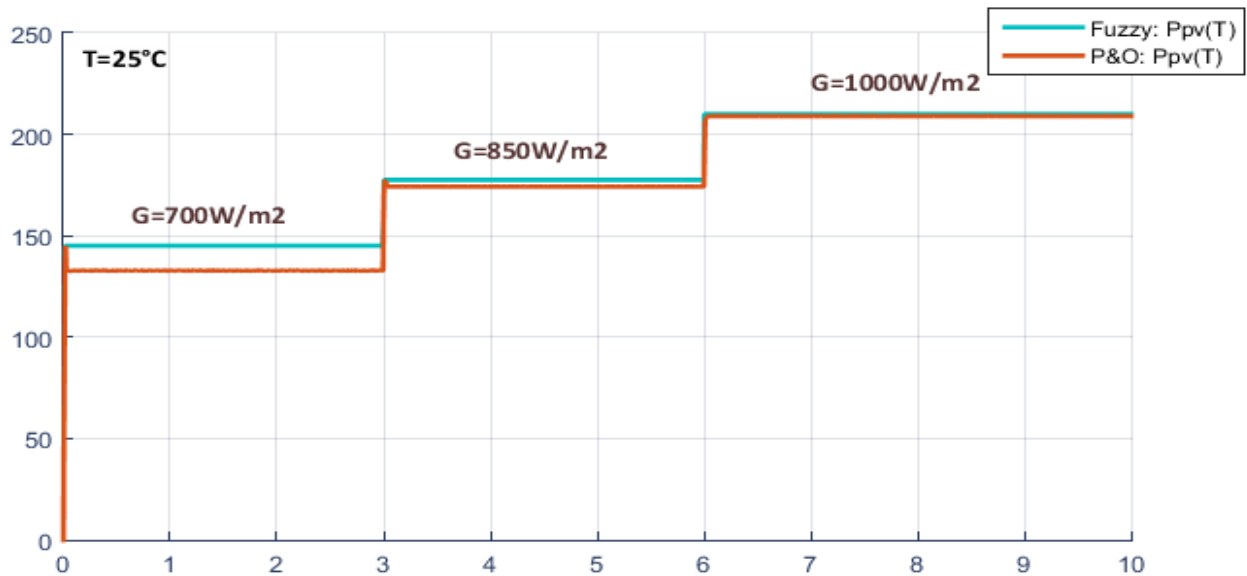


Figure 4.20. Puissances obtenues par l'algorithme P&O et l'algorithme Hill Climbing basé sur la logique floue avec [600W/m² - 1000W/m²].

Les courbes de la figure 4.20 donnent le résultat de la poursuite de cette puissance par les deux contrôleurs séparément. En examinant de près ces courbes, il apparaît clair que le suiveur à base du contrôleur flou, donne une puissance qui monte en escalier, en accord avec les variations de l'irradiation solaire jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur maximale souhaitée ($P_{pv}=145.1W$, $P_{pv}=177.6W$ puis $P_{pv}=210W$) avec un temps de réponse de $t=0.014s$.

Nous constatons une nette amélioration de la puissance maximale, tout en évitant les dépassements.

4.6 Conclusion

Au cours de notre travail, fait sur le principe de la poursuite du PPM, nous avons analysé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK le fonctionnement électrique d'un système PV, adapté par un convertisseur DC-DC de type hacheur boost, et régulé par une commande MPPT.

Ce dernier chapitre a été consacré pour l'étude comparative entre trois algorithmes de commande MPPT, incluse dans un système PV fonctionnent sous une température standard de 25°C et une intensité de l'irradiation solaire variable.

Les résultats obtenus montrent que : Pendant une durée inférieure et en variant d'une manière automatique le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur le système converge vers les conditions optimales indépendamment de l'intensité changeante de l'irradiation solaire. Ces résultats, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques, de même que les résultats obtenus lors de l'application du régulateur flou de Mamdani ont montré un comportement satisfaisant et un très bon temps de réponse du système ainsi que des performances élevées. Toutefois, il y a un inconvénient qui réside dans le temps de calcul qui est relativement grand lors d'une implémentation pratique.

Conclusion générale

Le travail qu'on a présenté dans ce mémoire, porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque, ce système présente une caractéristique de puissance en fonction de tension non linéaire, et cela présente un problème pour l'exploitation de la puissance maximal de l'installation.

Cette étude a comme objectif la recherche des solutions optimisées pour réaliser une adaptation entre le GPV et la charge. Pour ce faire, nous avons introduit un convertisseur DC/DC de type boost, et un contrôleur numérique « commande MPPT », pour assurer la poursuite de la puissance maximal fourni par le module PV.

Nous avons commencé à introduire des notions théoriques sur les cellules solaires et la construction d'un module photovoltaïque ainsi que ces avantages spécifiques. Nous avons rappelé le principe de deux algorithmes MPPT, les plus populaires « P&O et Hill Climbing », en analysant aussi le convertisseur DC/DC qui sert à l'adaptation entre le GPV et la charge, et on s'est rendu compte aux notions de la logique Floue dans le chapitre trois.

Dans le dernier chapitre, nous avons réalisé nos simulations dans l'environnement Matlab/Simulink, tous d'abord nous avons commencé par la modélisation du panneau PV Kyocera KD210GH-2PU, que l'on a choisi pour notre travail, on a effectué une connexion direct du PS à la charge, et une connexion indirecte contenant un convertisseur DC/DC de type boost entre le GPV et la charge, pour remédier les fluctuations du PPM dû a la variations de l'irradiations solaire.

Après l'adaptattion entre le PS et la charge, une comparaison était faite entre les trois techniques « P&O, Hill Climbing et Hill Climbing basée sur la logique Flou » dans des conditions quasiment similaires, pour vérifie l'efficacité et les performances de chaque algorithme entre eux.

Après l'implémentation de l'étage d'adaptation avec la commande MPPT, nous pouvons conclure que :

- L'utilisation d'un convertisseur de type Boost manipulé avec une commande MPPT donne une grande efficacité.
- La commande floue avéré être très performante lors de changement des conditions climatiques.
- Les résultats, montrent aussi que l'utilisation de la commande MPPT floue permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques, et que cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques.

Bibliographie

- [1] Boudghene Stambouli, a., 'Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 15, (2011), 1169 -1181.
- [2] L'Actual, No. 81, Les Nouvelles Revues Algérienne, Juillet 2007, www.actual-dz.com.
- [3] Ministère de l'énergie et des mines, [http:// www.mem-algeria.org/francais/ index. PHP ? Page=énergies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lnergie](http://www.mem-algeria.org/francais/index.PHP?Page=énergies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lnergie).
- [4] F. Lasnier, T.G. Ang, 'Photovoltaic Engineering Handbook', IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.
- [5] Antonio Luque and Steven Hegedus, 'Handbook of Photovoltaic science and Engineering ', John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [6] F. Lasnier, T. G. Ang, 'Photovoltaic Engineering Handbook', IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.
- [7] S. Ghabrour 'modélisation et simulation d'un système de pompage alimenté par un générateur photovoltaïque dans l'environnement MATLAB/SIMULINK ', Thèse de magister université de Batna année 2001/2002
- [8] Maouedj Rachid, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah', Mémoire De Magister soutenue en 2005
- [9] Photovoltaïque Electricité solaire, document délivré par l'association suisse des professionnels de l'énergie solaire.
- [10] : Guide encyclopédie, CD.
- [11] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

- [12] M. Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [13] Ludovic Protin, Stéphan Astier ; « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'Ingénieur -D3 360-.
- [14] M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse 2009
- [15] Laura Baxerres, Aurélie Michallet, Céline Ramet, Rapport_PIP_Microtransat_Energie_I, "Partie électronique et énergétique", 2005-2006
- [16] Mohamed Lakhdar Louzane « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes- Application zone de Ouargla » Thèse de doctorat en sciences.
- [17] M. BOUDJEMA, N. BELHAOUAS : 'Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones et implémentation sur FPGA et DSP', Projet de Fin d' Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Promotion Juin 2007.
- [18] M. ISSAADI SALIM : 'Commande d'une Poursuite du Point de Puissance Maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones', Diplôme Magister d'état en électronique ENP, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, promotion 2006.
- [19] C. CEDRIC : 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque', Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, Décembre 2008.
- [20] M.I. Hocein, S.A.Khan, M. Shafiullah, M.J.Hossein: 'Design and Implementation of MPPT Controlled Grid Connected Photovoltaic System', IEEE, 2011.
- [21] M. BOUKLI-HACENE Omar : 'Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique', Thèse de magister, Université ABOUBAKR BELKAID- TLEMCEN, année 2010/2011.

- [22] Mlle K. Ayache : 'Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique', Mémoire de Magister en Commande des Machines Électriques, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, septembre 2014.
- [23] A. P. Hohm, M. E. Ropp: 'Comparative study of Maximum Power Point Tracking algorithms', Progress in Photovoltaic, Vol 11, pp. 47-62, January 2003.
- [24] M. Amarouyache : 'Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque', Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Constantine 1, Mars 2014.
- [25] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli: 'Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mars 2004.
- [26] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Blaadbjerg: "Improved MPPT Algorithms for rapidly Changing Environmental Conditions", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 1614-1619, Août 2006.
- [27] W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel et D. O'Sullivan: 'A new maximum power point tracking system', IEEE Power Electronics Specialists Conference 1993, PESC'93, pp. 833-838, Juin 1993.
- [28] W. Xiao, W. G. Dunford: 'Evaluating maximum power point tracking performance by using artificial lights', Industrial Electronics Society, IEEE IECON'04, Vol. 3, pp. 2883-2887, November 2004.
- [29] S. Lahlah : 'Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill Climbing (H.C)', MEMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Promotion 2007.
- [30] S. Issaadi : 'commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones', Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [31] MESSAI Adnane : 'Contribution à l'amélioration des performances de la commande mppt d'un système photovoltaïque en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle programmables', Thèse de doctorat en Electronique, Université de Blida, Novembre 2012.

- [32] Badia AMROUCHE : ' CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE METHODE MPPT BASEE SUR LES CONCEPTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES', THESE DE DOCTORAT Spécialité, Communication. Blida, mars 2013.
- [33] J.David Irwin, MUHAMMAD H.RASHID: ' Power electronics Handbook 'University of West Florida Joint Program and Computer Engineering Copyright, 2001 by ACADEMIC PRESS.
- [34] L.Baghli, 'Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques', Thèse de Doctorat, Faculté des sciences, Nancy 1990.
- [35] A. Kaufmann, 'Introduction à la logique floue', Technique de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôle R.7 032, 1992.
- [36] L.Zahen, L.Xu, 'on-Line Fuzzy Tuning of indirect field-oriented induction machine drive', IEEE. Trans. On. Power. Electr, Vol. 13, N°. 1, pp-134-141, January 1998.
- [37] M. Blanchard, 'Algèbre de Boole', Technique de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôle R.7 050, 1992.
- [38] D.Driankov, H.Hellendoorn ET M.Reinfranf, 'An introduction to fuzzy control', Springer 1996.
- [39] B.Hu, K.I.Mann, R.G.Gosine, 'New Methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID control', IEEE Trans On fuzzy Sys, Vol.7, N°.5, PP.521-539, Oct. 1999.
- [40] C.C. Lee, 'Fuzzy logic control system: Fuzzy logic controller, Part I', IEEE Trans. Syst. Man and cybernetics, Vol.20, PP.404-418, Mar/Apr. 1990.
- [41] R.R.Yager, D.P.Filev, 'Essentials of fuzzy modeling and control', John wiley & Sons. 1994.
- [42] B.B. Meunier, 'La Logique floue et ces applications', Edition Addison-Wesley, 1995.
- [43] H. Buhler, 'Réglage par logique floue' presse polytechnique, romandes 1995.
- [44] B.K.Bose, 'Power electronics and variable frequency drives', IEEE press, 1997.

- [45] R.BRADAI, 'Commande vectorielle de la machine asynchrone associée aux onduleurs multiniveaux Utilisation des régulateurs NEURO-FLOUS', Mémoire présenté pour l'obtention du titre de Magister en Génie Electrique, Université M'hamed Bouguerra Boumérdes, 2001.
- [46] C.C.Lee, 'Fuzzy logic control system: Fuzzy Logic controller, Part II', IEEE Trans.
- [47] F.L. Lewis, K. Liu, 'Toward a paradigm for fuzzy logic control', Automatica, Vol. 32, N°2, PP.167-181, 1996.
- [48] Mr F.HARROUCHE, 'Application de logique floue aux machines tournantes', Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Ferhat Abbas-SETIF UFAS (ALGERIE).
- [49] G. Balasubramanian, S. Singaravelu, 'Fuzzy logic controller for the maximum power point tracking in photovoltaic system', Department of Electrical Engineering Annamalai University Annamalainagar-608 002, INDIA, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 41– No.12, March 2012.
- [50] M. AZZOUZI, 'Comparaison between MPPT P&O and MPPT Fuzzy Controls in Optimizing the Photovoltaic Generator', Faculty of Sciences and Technology Ziane Achour University of Djelfa, Algeria, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 3, No. 12, 2012.
- [51] H. Abouobaida, M. Cherkaoui, M. Ouassaid , "Robust Maximum Power Point Tracking for Fast Changing Environmental Conditions", International Review on Modeling and Simulations, 2011, Vol. 4 n. 1, p. 391-396
- [52] H. Abouobaida, M. Cherkaoui, "Backstepping controller in close cooperation with MPPT algorithm for PV system", Journal of Electrical Engineering, 2012, Vol 12, - Edition 3
- [53] Dhople, S.V. Davoudi, A. Nilles, G. Chapman, P.L. «Maximum power point tracking feasibility in photovoltaic energy-conversion systems», IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, pp. 102-108.
- [53] Mr F.HARROUCHE, 'Application de logique floue aux machines tournantes', Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Ferhat Abbas-SETIF UFAS (ALGERIE).