



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



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Électronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Présenté par : **KADET Ikhlas**

TAMENE Kholoud

Thème

Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Générateur Photovoltaïque

Soutenu le 19 / 06 / 2022

Devant le Jury :

CHEBBAH Khaira	Présidente	M.C.B	Univ-Tissemsilt
MEHARRAR Aoued	Encadreur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
BARBARA Djillali	Examineur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt
TAIBI Ahmed	Examineur	M.A.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2021-2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu **الله** le tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour terminer ce modeste travail. Il nous est agréable d'exprimer nos profondes reconnaissances ainsi que nous sincère gratitude à tous ceux qui nous ont encouragés et qui ont contribué directement ou indirectement à l'élaboration de ce modeste travail et particulièrement à : notre encadrant, **Dr : MEHARRAR AOUED**, Maître de Conférence à l'Université de Tissemsilt, pour sa disponibilité et ses précieux conseils répétés, d'être très serviable avec nous, et pour tout l'aide rapporté durant les étapes de réalisation de ce travail. Nous tenons à remercier la présidente **Dr : CHEBBAH Khaira** , Maître de Conférence à l'Université de Tissemsilt et les membres du jury **Dr : BARBARA Djillali**, Maître de Conférence à l'Université de Tissemsilt et **Dr : TAIBI Ahmed.**, Maître assistant à l'Université de Tissemsilt de nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail. A tous les enseignants qui nous ont enseigné durant toutes les étapes scolaires de notre vie,

UN GRAND MERCI.

DEDICASE

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire "Ya

Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à :

Ma mère et mon père

Que dieu les gardes et les protèges.

A mes adorables sœurs

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

Mon binôme Khouloud .

Ikhlās

Dédicace

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire "Ya

Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à :

Ma mère et mon père

Que dieu les gardes et les protèges.

A mes adorables sœurs

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

Mon binôme Ikhlas.

KHOULOD

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction général	1
Chapitre 1. Généralités sur L'énergie solaire photovoltaïque	3
1 Introduction	3
2 Les énergies renouvelables	3
3 L'énergie solaire	3
3.1 L'énergie solaire thermique.....	3
3.2 L'énergie solaire photovoltaïque.....	4
4 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	4
5 Les technologies des cellules photovoltaïques	5
5. 1 Les cellules monocristallines.....	6
5. 2 Les cellules poly cristallines.....	6
5.3 Les cellules amorphes.....	7
6 Les applications de l'énergie photovoltaïque	7
6.1 Télécommunications et Signalisation.....	7
6.2 Systèmes de pompage.....	8
6.3 Connexion photovoltaïque au réseau.....	8
6. 4 Photovoltaïque intégré dans les bâtiments et les maisons.....	8
6.5 Éclairage public	9
7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	10
7. 1 Avantages	10
7. 2 Inconvénients	11
8. Conclusion	11
Chapitre 2. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque	12
1 Introduction	12
2 Modèle d'une cellule photovoltaïque.....	12
3 Résultats obtenus.....	14
4 Caractéristiques de module photovoltaïque	15
5 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module	

photovoltaïque.....	16
5.1 Influence de l'irradiation	16
5.2 Influence de la température.....	17
6 Conclusion.....	19
Chapitre 3. Convertisseur DC-DC pour la poursuite du point de puissance maximum.....	20
1 Introduction	20
2 Principe de la commande MPPT.....	20
2.1 L'algorithme Perturbe & Observe.....	21
2.2 Conductance incrémentale (Inc-Cond).....	22
2.3 Méthode linéaire.....	22
2.3.1 Méthode de tension en circuit ouvert V_{oc}	22
2.3.2 Méthode du courant de court-circuit I_{cc}	22
2.4 L'intelligence artificielle pour la poursuite du point de puissance maximum.....	23
2.5 Les convertisseurs DC-DC.....	23
3 Modèle mathématique du convertisseur survolteur (ou Boost).....	23
3.1 Modélisation des hacheurs survolteur ou boost.....	24
3.2 Commande du convertisseur.....	26
3.3 Contrôle direct du rapport cyclique (Voltage Mode Control).....	26
4 Conclusion.....	27
Chapitre 4. Contrôleur MPPT à base de la logique floue.....	28
1 Introduction	28
2 Bref historique de la Logique Floue	28
3 Principe de La logique floue	29
4 Avantages et inconvénients de la logique floue	30
4.1 Avantages de la logique floue	30
4.2 Inconvénients de la logique floue	30
5 MPPT par logique floue.....	31
6 Résultats obtenus.....	34
7 Conclusion.....	35
Conclusion générale.....	36
Bibliographie.....	37
Annexe.....	41
Annexe A.....	41
Annexe B.....	43
Résumé et mots clés.....	48

Nomenclature

I_L	Photo- courant générée (A)
I_0	Courant de saturation (A)
I	Courant fourni par la cellule (A)
U	Tension aux bornes de la cellule (V)
R_s	Résistance en série (Ω)
α	Tension thermodynamique (V)
Φ	Eclairement (irradiation solaire) réels (w/m ²)
Φ_{ref}	Eclairement dans la condition de référence ; Φ_{ref} w/m ² à 25°C
T_C	Température de la cellule (°C)
$T_{c,ref}$	Température de cellule à la condition de référence (25°C)
$\mu_{I,CS}$	Coefficient de sensibilité de l'intensité a la température (A/°C)
V_t	La tension thermique à la température TC ($.T_C$)
q	La charge de l'électron ($1,602.10^{-19}$)
K	La constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$)
E_g	L'énergie de gap pour le silicium. ($1,17eV$)
a	Facteur d'idéalité de la diode
I_{CC}	Courant de court-circuit (A)
V_{OC}	Tension à circuit ouvert (V)
a_{ref}	la valeur de α dans les conditions référentielles.
V_i	Tension du PV(V)
I_l	Courant dans l'inductance (A)
I_o	Courant de charge (A)
L	Inductance de lissage(H)
C_1, C_2	Condensateurs de filtrage (F)
α	Rapport cyclique

Abréviations

PV	Panneau photovoltaïque.
GPV	Générateur photovoltaïque.
MPPT	Maximum power point tracking.
DC /DC	Convertisseur continue / Continue.
P&O	Perturbation and observation.
MPP	Point de puissance maximale.
VMC	Voltage mode control.

Liste des figures

Fig. 1- Le chauffe-eau solaire	4
Fig.2 - Central solaire à tour.....	4
Fig.3 -Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	5
Fig.5 - Les cellules monocristallines	6
Fig.6 - Les cellules polycristallines.....	6
Fig.7 - les cellules amorphes.....	7
Fig.8 - Système d'énergie solaire pour les télécommunications.....	7
Fig.9 - Schéma d'un système de pompage photovoltaïque.....	8
Fig.10 – Connexion photovoltaïque au réseau électrique.....	8
Fig.11 - Photovoltaïque intégré dans les bâtiments en Allemagne.....	9
Fig. 12 - Eclairage domestique photovoltaïque.....	9
Fig. 13 - éclairage public photovoltaïque.....	10
Fig.14 - Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	12
Fig.15- Schéma bloc du module PV.....	14
Fig. 16 - Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$	15
Fig.17-Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T= 25^\circ\text{C}$	16
Fig.18- Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25 \text{ }^\circ\text{C}$	17
Fig. 19 - : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25 \text{ }^\circ\text{C}$	17
Fig. 20-Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=10, 25, 50 \text{ }^\circ\text{C}$) et $G = 1000\text{W/m}^2$	18
Fig.21 -Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=10, 25, 50 \text{ }^\circ\text{C}$) et $G = 1000\text{W/m}^2$	18
Fig.22 Chaîne de conversion photovoltaïque.....	20
Fig.23 - Schéma électrique d'un hacheur boost	23
Fig. 24 - convertisseur survolteur (cas ou k fermée).....	24
Fig.25 - convertisseur survolteur (cas ou k ouvert).....	24
Fig .26- Schéma de la commande par contrôle direct du rapport cyclique.....	26
Fig . 27 - Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique	29

Fig. 28 - Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.....	30
Fig .29- Phases de la logique floue.....	31
Fig. 30- Fuzzification de ΔV	32
Fig. 31- Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée du système.....	32
Fig.32- La fonction d'appartenance de la variable de sortie du système	32
Fig.33- la variation de l'éclairement	34
Fig. 34 -puissance optimale et maximisée par le contrôleur MPPT.....	34

Liste des tableaux

Tableau 1 - Caractéristiques du module PV à 25°C et 1000 W/m ² [33]	
Tableaux.2 : Principe de l'algorithme P&O [3].	21
Tableau. 03 - Règles permettant de déterminer les fonctions et les degrés d'appartenance de ΔV_{ref} .	33

Introduction général

Actuellement, la production de l'énergie électrique est essentiellement basée sur l'utilisation des carburants fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel, ou sur l'utilisation de la fission nucléaire (cas des centrales nucléaires) [1]. L'utilisation des carburants fossiles, permet de réduire les coûts de production électrique, mais conduit à des émissions des gaz à effet de serre. L'énergie de la fission nucléaire ne rejette pas des gaz à effet de serre, mais les risques d'accident liée à leur utilisation (comme le cas de la catastrophe de Tchernobyl, 26 avril 1986 en Ukraine) ou due à des phénomènes naturelles comme : séisme, tsunami (par exemple, accident nucléaire de Fukushima, en Japon, 11 mars 2011), sont ainsi très probables et responsables d'émissions radioactifs qui ont des conséquences Indésirables sur l'humanité et l'environnement.

En plus, le traitement des déchets nucléaires est très coûteux et leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années.

Pour réduire les risques liés à l'utilisation de ces technologies, plusieurs pays commencent à produire une quantité de leur énergie électrique à partir de l'utilisation des sources renouvelables (comme le soleil et le vent).

Ce travail a pour but d'étudier la modélisation et la simulation d'un contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum d'un générateur photovoltaïque, associé à un convertisseur DC/DC. Le travail a été structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente un aperçu théorique sur l'énergie solaire photovoltaïque. Dans ce chapitre, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est présenté.

Le second chapitre concerne, la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque. Cette modélisation permet de trouver la variation instantanée de la puissance de PV en fonction de leur tension. Pour la modélisation et la simulation de PV, nous avons utilisé le logiciel MATLAB®-SIMULINK®.

Le troisième chapitre décrit en détail les différentes techniques de suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque ainsi la modélisation d'un convertisseur DC-DC du type élévateur, dont la commande de ce convertisseur se fait par un contrôle direct du rapport cyclique (VMC : voltage mode control).

Le quatrième chapitre a pour but d'étudier un contrôleur MPPT à base de la logique floue, ce contrôleur permet de prédire une tension optimale à partir de deux variables floues d'entrée : la variation de la tension de PV et leur variation de la puissance. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité et la robustesse du contrôle proposé.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre 1

Généralités sur l'énergie Solaire Photovoltaïque

1 Introduction

L'électricité solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur. Cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électriques [2]. Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu général sur cette énergie prometteuse.

2 Les énergies renouvelables

Par rapport aux énergies fossiles (comme le pétrole et le gaz) les énergies renouvelables sont considérées comme des sources inépuisables, c'est-à-dire sa vitesse de formation est plus grande que sa vitesse d'utilisation [3] [4]. Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs raisons [5] :

- elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettant pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;

- elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;

Parmi les énergies renouvelables nous citons : L'hydraulique, le solaire (thermique et photovoltaïque), l'éolien, la biomasse et la géothermie.

3 L'énergie solaire

L'énergie solaire : est une source d'énergie qui dépend du soleil [6]. Cette énergie est actuellement exploitée selon deux techniques [7] :

- la conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (cellule photovoltaïque) c'est le solaire photovoltaïque.

- la conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques c'est le solaire thermique.

3.1 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique [8]. Cette transformation peut être utilisée directement pour fournir de l'eau chaude sanitaire (voir la figure 1) ou utilisée pour la production d'électricité (figure 2).



Fig. 1- Le chauffe-eau solaire [9]



Fig.2 - Central solaire à tour [10]

3. 2 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée du rayonnement solaire grâce à des panneaux photovoltaïques et convertis directement en électricité. Outre les avantages liés aux faibles coûts de maintenance des systèmes photovoltaïques, cette source d'énergie répond parfaitement aux besoins des lieux isolés où le raccordement au réseau est trop coûteux [8].

4 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques utilisent l'effet photoélectrique pour générer du courant continu en absorbant le rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité à travers un matériau semi-conducteur.

Une cellule photovoltaïque est constituée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'un dopé avec le bore (côté P) et l'autre avec le phosphore (côté N), comme montre la figure (3) [11].

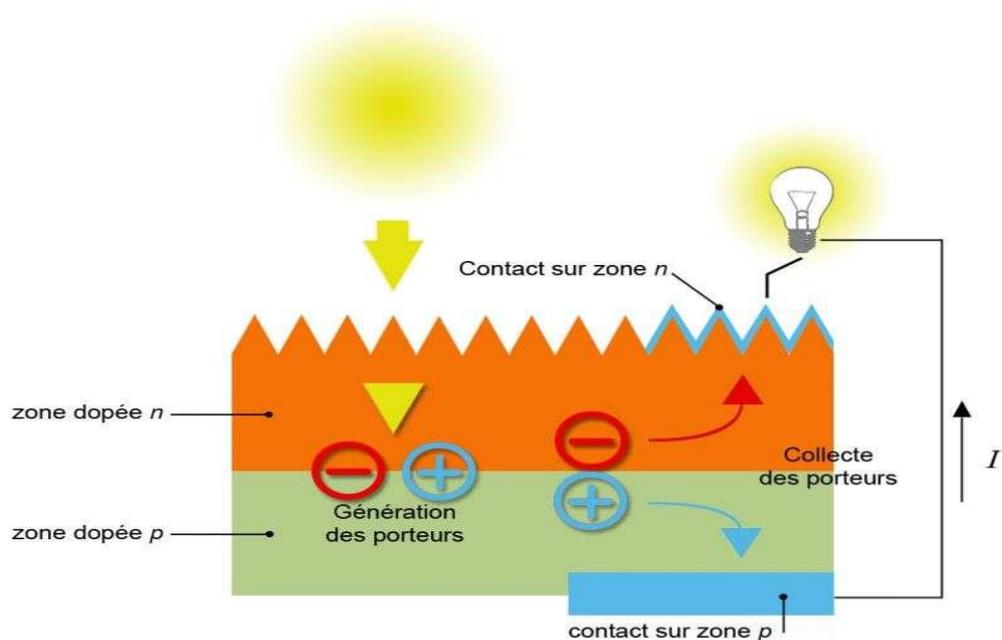


Fig.3 -Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [12]

Au voisinage de cette jonction P-N, un champ électrique maintient la séparation des charges électriques. Lorsqu'un photon vient frapper la cellule, il arrache des électrons par effet photoélectrique et crée un pair : électron - trou. L'électron a suffisamment d'énergie pour franchir la jonction et il est collecté du côté N. Un courant électrique est donc créé.

Pour produire plus d'électricité, des cellules solaires sont assemblées pour former un module (voir la figure 4). Les panneaux photovoltaïques sont constitués de modules photovoltaïques interconnectés série et/ou parallèle pour générer la puissance requise[13].

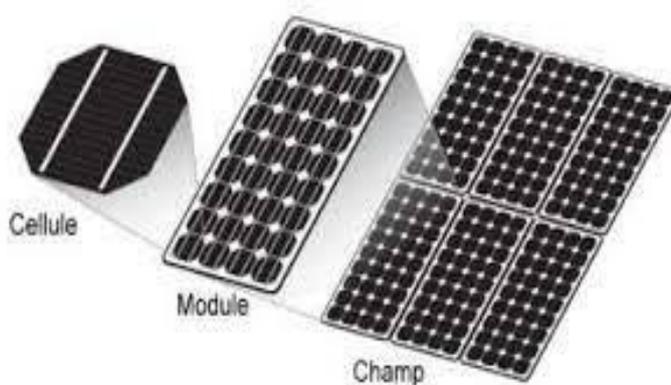


Fig.4 -La cellule au champ photovoltaïque [14]

5 Les technologies des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium. Chaque type de cellules a un

rendement qui lui est spécifique. Par contre quel que soit leurs types, leur rendement est assez faible de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules :

5. 1 Les cellules monocristallines

Ce type des cellules (figure 5), sont caractérisés par un meilleur rendement ainsi qu'un coût très élevé, du fait que leur fabrication est compliquée [15].



Fig.5 - Les cellules monocristallines [16].

5. 2 Les cellules poly cristallines

Ce type des cellules (figure6) elles sont moins chères à produire et possèdent un rendement plus faible que les cellules monocristallines.

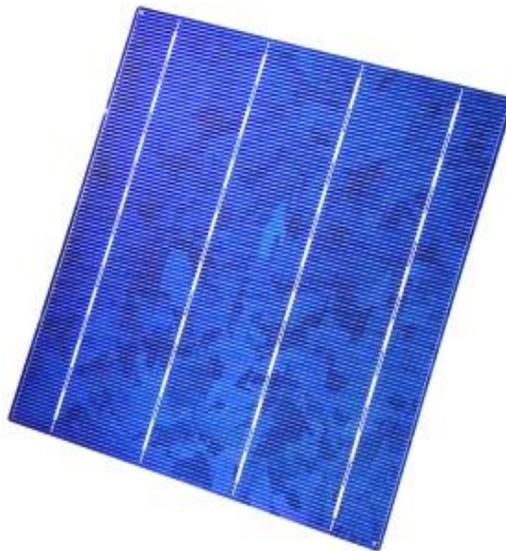


Fig.6 - Les cellules polycristallines [17]

5.3 Les cellules amorphes

Les cellules amorphes (figure7), sont utilisées dans de petits produits tels que des calculatrices ou encore des montres elles ont un rendement assez faible, elles nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium donc un cout plus élevé [18]

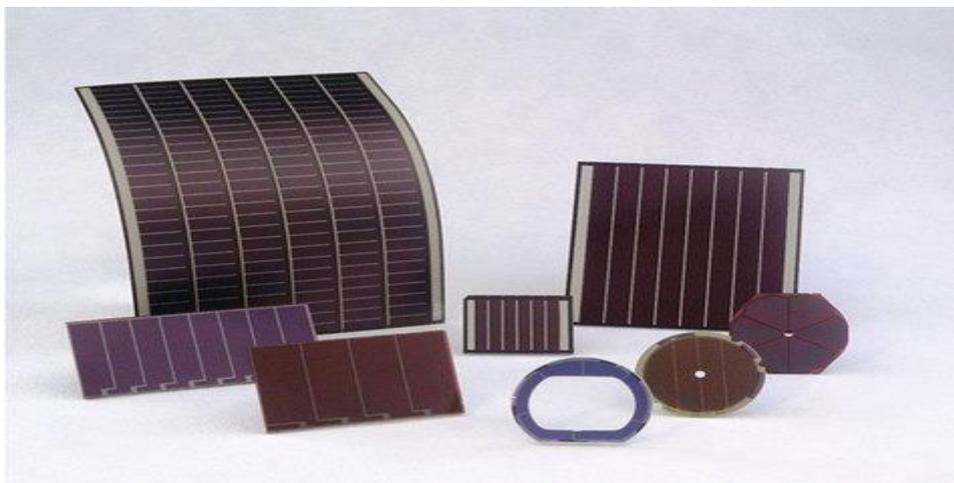


Fig.7 - les cellules amorphes [19]

6 Les applications de l'énergie photovoltaïque

Il existe plusieurs domaines d'application des cellules photovoltaïques [20] :

6.1 Télécommunications et Signalisation

L'énergie solaire photovoltaïque est idéale pour les applications de télécommunication (Figure 8), en particulier dans des applications telles que les postes téléphoniques locaux, les antennes de radio et de télévision.



Fig.8 - Système d'énergie solaire pour les télécommunications [21]

6.2 Systèmes de pompage

Le PV est également utilisé pour alimenter des installations de pompage pour l'irrigation, l'eau potable dans les zones rurales et l'eau du bétail. La figure (9) représente un schéma d'un système de pompage photovoltaïque [22].

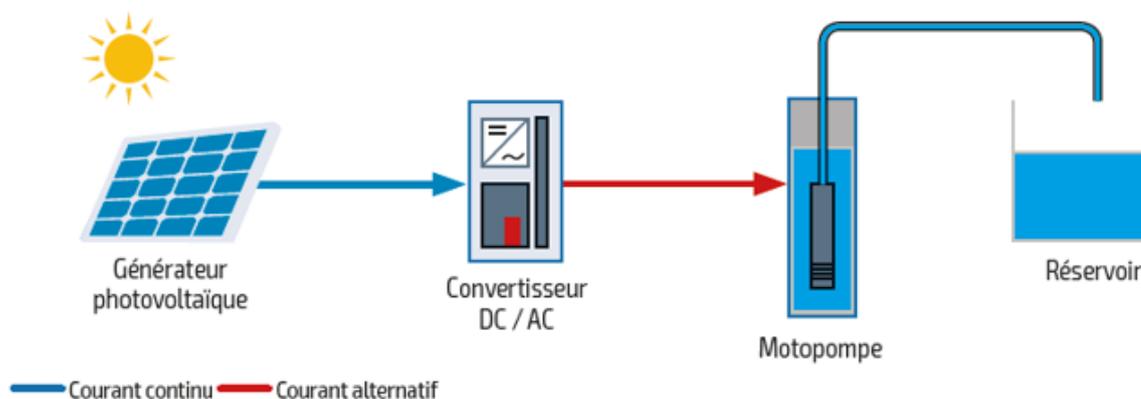


Fig.9 - Schéma d'un système de pompage photovoltaïque [22]

6.3 Connexion photovoltaïque au réseau

L'une des principales applications de l'énergie solaire photovoltaïque qui s'est développée ces dernières années est les centrales électriques connectées au réseau (figure 10), ainsi que les systèmes photovoltaïques d'autoconsommation, généralement de moindre puissance, mais également connectés au réseau [23].

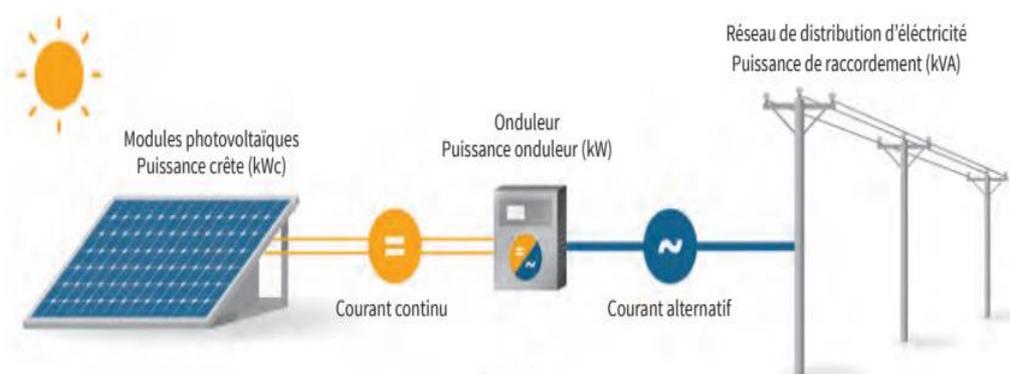


Fig.10 – Connexion photovoltaïque au réseau électrique [23]

6. 4 Photovoltaïque intégré dans les bâtiments et les maisons

De nombreuses installations photovoltaïques sont souvent situées dans des bâtiments : elles sont généralement situées sur un toit existant ou intégrées dans des éléments de la structure du bâtiment, tels que des lucarnes, des puits de lumière ou des façades.

Le photovoltaïque intégré au bâtiment et aux maisons est de plus en plus intégré en tant que source principale ou secondaire d'énergie électrique (figures11 et 12), [24], [26]



Fig.11 - Photovoltaïque intégré dans les bâtiments en Allemagne [24]

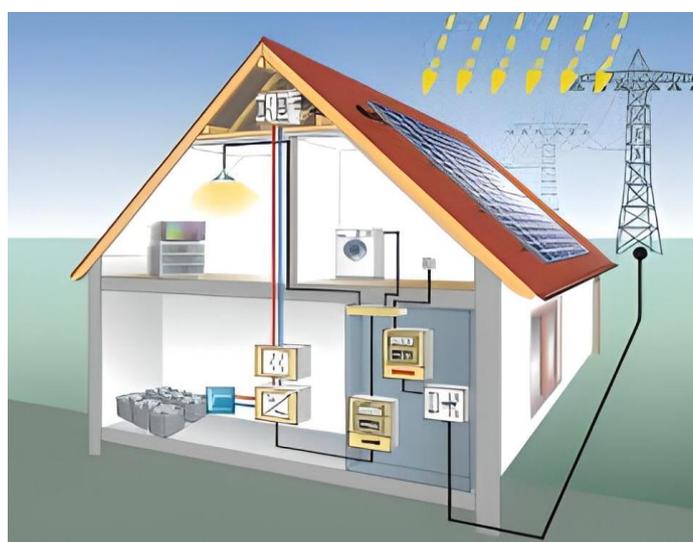


Fig. 12 - Eclairage domestique photovoltaïque [27]

6.5 Éclairage public

C'est un éclairage public sauf que la source d'énergie de son fonctionnement est produite à partir de l'énergie solaire comme montre la figure (13). Dans ce type d'éclairage plus que les moyens utilisés dans l'éclairage conventionnel (les lampes et les lampadaires) il présente comme moyens : un générateur photovoltaïque, une batterie d'accumulation et un régulateur [28].

Cette technique permet d'obtenir des rendements équivalents à des sources lumineuses de haute puissance.



Fig. 13 - éclairage public photovoltaïque [29].

Il existe également d'autres possibilités pour l'application de modules solaires dans les plages de puissance plus faibles. Ils sont mis en œuvre avec succès dans les calculatrices solaires, les appareils de mesure, les chargeurs de batteries solaires, les jouets solaires et bien d'autres applications mobiles [25].

7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont [30] ;

7.1 Avantages

- Énergie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

7. 2 Inconvénients

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technique demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles de 12 à 20%.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types d'énergie solaire, ensuite, nous décrivons en détail le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les différentes technologies des cellules photovoltaïques utilisées, ainsi que les applications de l'énergie photovoltaïque sont également exposées.

Chapitre 2

Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque

1 Introduction

La modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du générateur photovoltaïque (tension, courant) en fonction de deux entrées qui sont la température et l'éclairement reçu sur le plan du générateur. On rencontre dans la littérature plusieurs modèles mathématiques du panneau photovoltaïque (modèle à une diode, à deux diodes,..), qui ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant- tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. [31].

Dans notre cas, nous avons choisi le modèle à une diode, car ce modèle est le plus utilisé dans la littérature en raison de sa facilité

Dans ce chapitre nous allons modéliser un module photovoltaïque. Cette modélisation permet de trouver la variation instantanée de la puissance de PV en fonction de leur tension. Pour la modélisation et la simulation de PV, nous avons utilisé le logiciel MATLAB®-SIMULINK®.

2 Modèle d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électronique équivalent ci-dessous (figure 14). Nous pouvons considérer le cas d'une cellule idéale comprenant d'une source du courant et une diode en parallèle avec une résistance en série R_s [32]

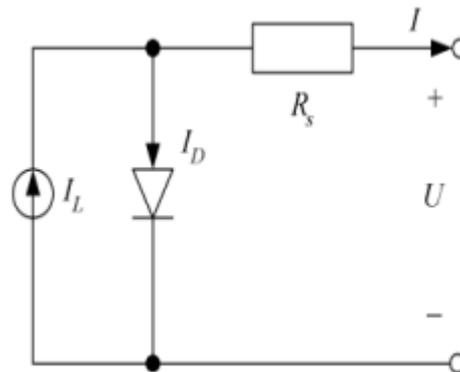


Fig.14 - Schéma équivalent d'une cellule idéale [33]

Les équations de ce modèle sont :

$$I = I_L - I_D \quad (1)$$

D'après le circuit électrique de la figure (14), le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme suivante:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{u - I_{RS}}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Cette équation contient 6 paramètres :

I_L : Photo- courant générée (A)

I_0 : Courant de saturation (A)

I : Courant fourni par la cellule (A)

U : Tension aux bornes de la cellule (V)

R_s : Résistance en série (Ω)

α : Tension thermodynamique (V)

Le photo-courant I_L peut être calculé comme :

$$I_L = \frac{\phi}{\phi_{ref}} [I_{Lref} + \mu_{I;sc} (T_C - T_{Cref})] \quad (3)$$

Avec :

Φ : Eclairement (irradiation solaire) réels (w/m2)

Φ_{ref} : Eclairement dans la condition de référence ; Φ_{ref} 1000 w/m2 à 25°C

T_C : Température de la cellule (°C)

$T_{c,ref}$: Température de cellule à la condition de référence (25°C)

$\mu_{I,cs}$: Coefficient de sensibilité de l'intensité a la température (A/°C)

Le courant de saturation I_0 est donné par la relation suivante :

$$I_0 = (I_{CC} \cdot \exp\left(\frac{v_{oc}}{\alpha V_t}\right) - 1) \cdot (T_C - 273) \frac{T_C - 273}{T_{Cref} - 273} \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_g}{a \cdot K} \cdot \left(1 - \frac{1}{T_{Cref}} - \frac{1}{T_c}\right)\right] \quad (4)$$

Avec :

$V_t = K \cdot T_C$: La tension thermique à la température TC

$q = 1,602 \cdot 10^{-19}$: La charge de l'électron

$K = 1,381 \cdot 10^{-23} J/$: La constante de Boltzmann

$E_g = 1,17 eV$: L'énergie de gap pour le silicium.

a : Facteur d'idéalité de la diode

I_{CC} : Courant de court-circuit (A)

V_{OC} : Tension à circuit ouvert (V) [33].

$$\alpha = \frac{t_c + 273}{T_{c,ref} + 273} \alpha_{ref} \quad (5)$$

Avec :

α_{ref} : la valeur de α dans les conditions référentielles.

3 Résultats obtenus

Le schéma bloc du module PV étudié est donné par la figure 15, ce module est constitué de 153 cellules en série, dont Les blocs A, B et C sont détaillés en annexe A.

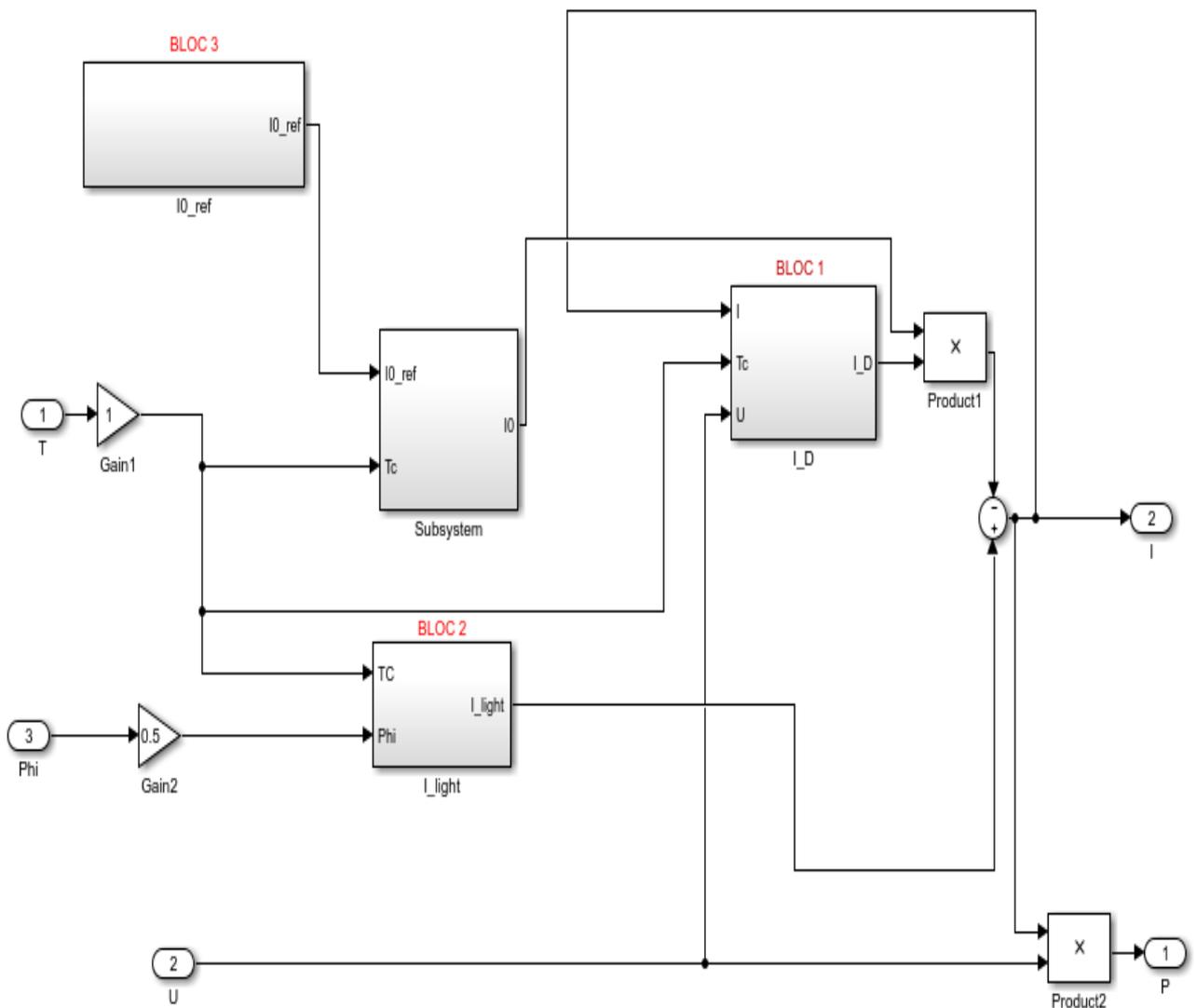


Fig.15- Schéma bloc du module PV

Les valeurs des paramètres de simulation de PV sont données par le tableau (1) suivant :

Tableau 1 - Caractéristiques du module PV à 25°C et 1000 W/m² [33]

$I_{L,ref}(I_{SC,ref})$	2.664 A
α_{ref}	5.472 V
Φ_{ref}	1000 W/m ²
$T_{c,ref}$	25 °C
R_s	1.324 Ω
$I_{mp,ref}$	2.448 A
$U_{mp,ref}$	70.731 V
$U_{oc,ref}$	87.72 V

4 Caractéristiques de module photovoltaïque

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension des modules photovoltaïques étudiés sont exprimés dans les figures suivantes ;

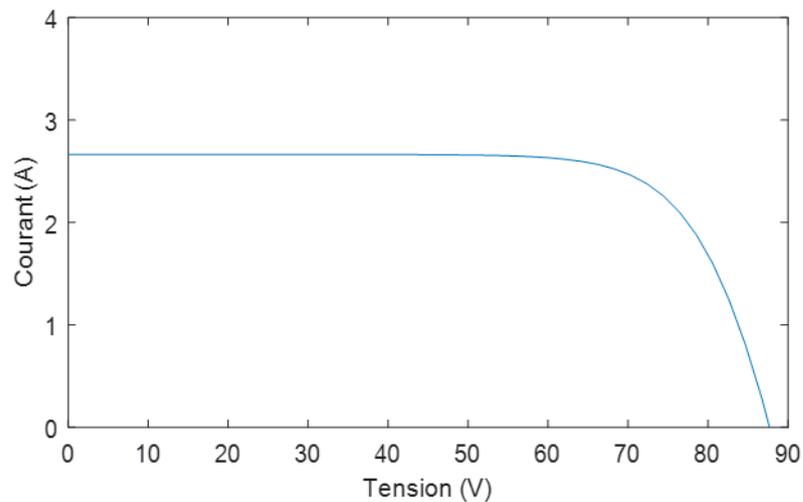


Fig. 16 - Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ °C}$.

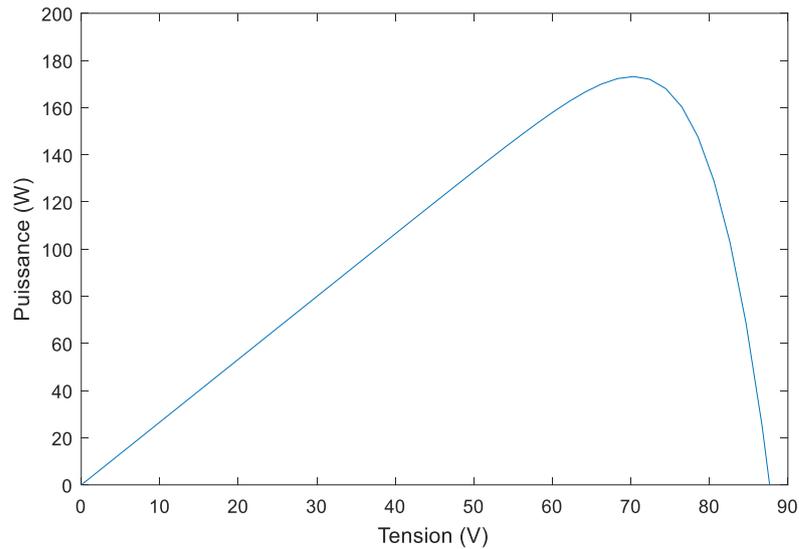


Fig.17- Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

À partir de ces deux figures, nous pouvons voir que :

L'évolution du courant part d'un courant de court-circuit correspondant à une tension nulle jusqu'à un circuit ouvert où le courant est nul et la tension atteint une valeur maximale.

La puissance commence à zéro, atteint une valeur maximale à la tension V_{mp} (c'est le point de puissance maximale PPM), puis disparaît lorsque la tension atteint une valeur maximale (la tension en circuit ouvert V_{oc}).

Les figures (16) et (17) montrent que les modules PV ne peuvent être assimilés à aucun générateur conventionnel et que les panneaux PV sont considérés comme une source d'énergie.

5 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque.

5.1 Influence de l'irradiation.

Dans les figures (18, 19), nous représentons les résultats concernant les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du panneau à 25° obtenus pour diverses valeurs de l'éclairement.

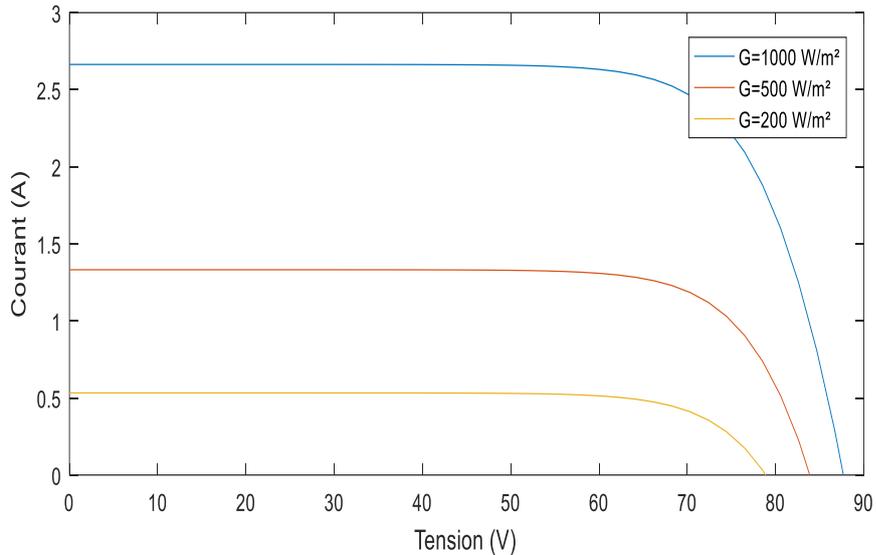


Fig.18- Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

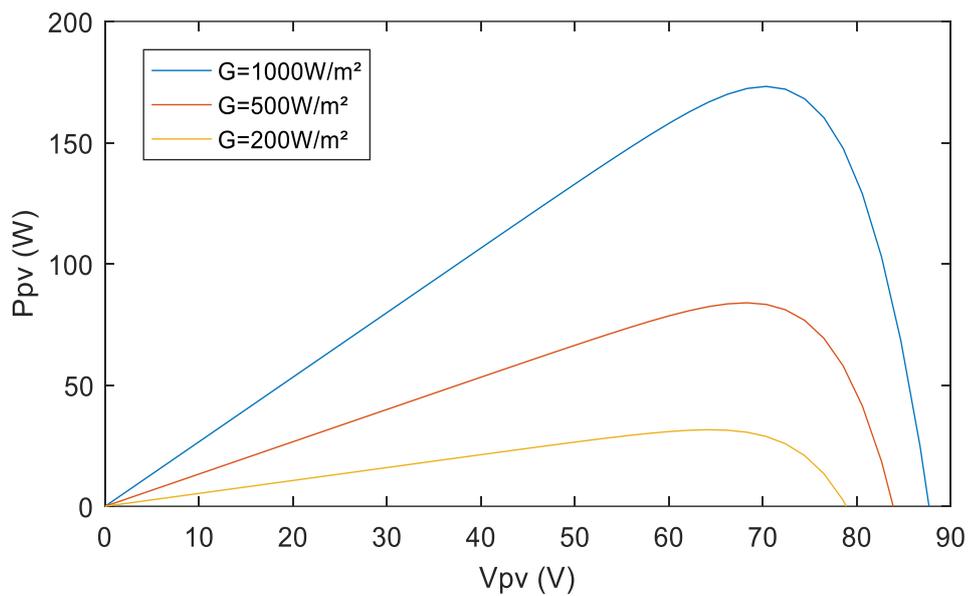


Fig. 19 - : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les figures présentes, montrent bien que l'augmentation de l'éclairement joue rôle bénéfique sur les caractéristiques électrique d'un PV.

5.2 Influence de la température

Les figures (20, 21) indiquent les caractéristiques I(V) et P(V) à différentes valeurs de température et éclairement constant :

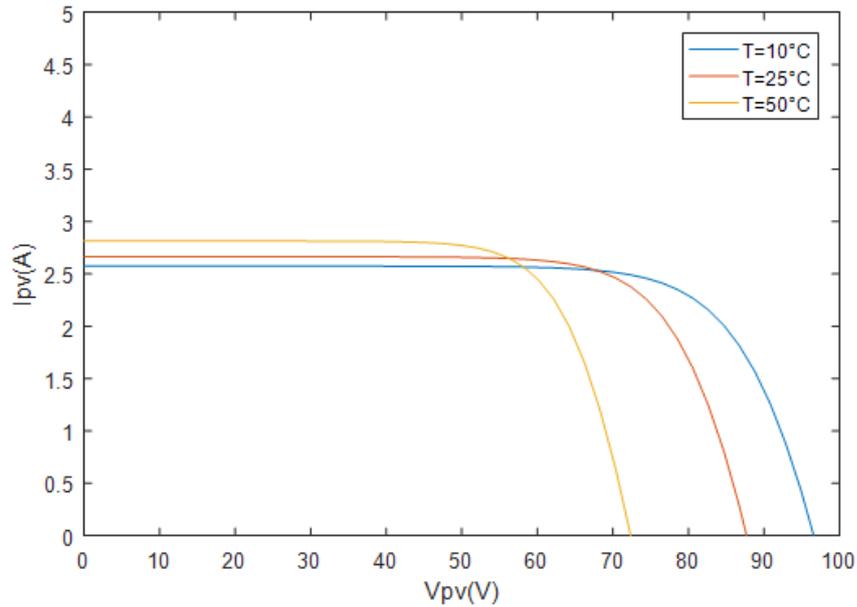


Fig. 20-Caractéristique courant –tension d’un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=10, 25, 50^\circ\text{C}$) et $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$.

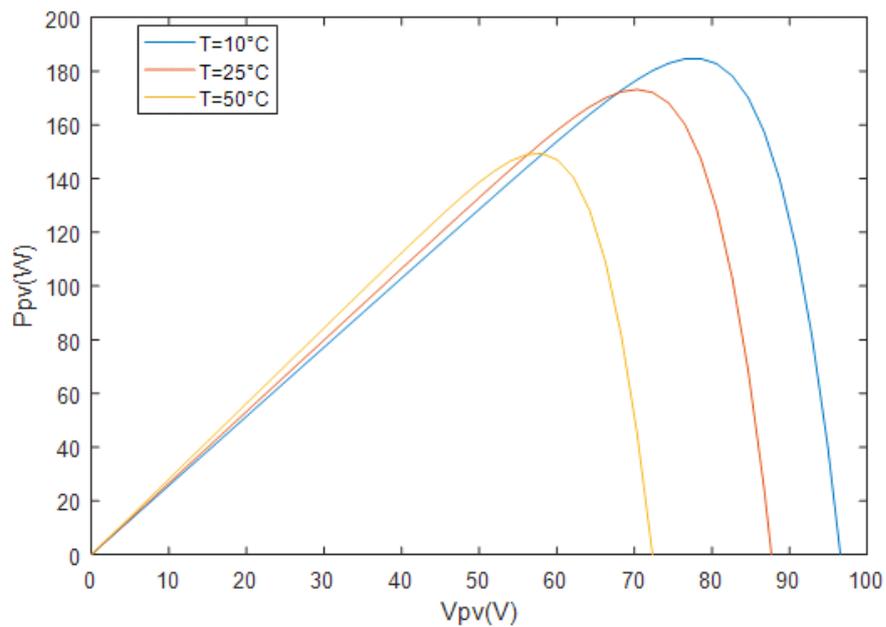


Fig.21 -Caractéristique puissance –tension d’un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=10, 25, 50^\circ\text{C}$) et $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$.

Comme on peut le voir sur ces figures, lorsque la température augmente, la tension en circuit ouvert V_{oc} chute fortement et le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque puis sa modélisation et la simulation avec les différentes caractéristiques de celle-ci. Enfin nous avons vu l'influence des conditions climatiques (l'éclairement et la température) sur la caractéristique courant- tension et la caractéristique puissance-tension d'un PV.

Chapitre 3

Convertisseur DC-DC pour la poursuite du point de puissance maximum

1 Introduction

La caractéristique de la puissance électrique d'un PV est naturellement non linéaire et nécessite impérativement d'adopter une stratégie de recherche du point maximal de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Ce chapitre décrit en détail les différentes techniques de suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque ainsi la modélisation d'un convertisseur DC-DC du type élévateur, dont la commande de ce convertisseur se fait par un contrôle direct du rapport cyclique (VMC : voltage mode control).

2 Principe de la commande MPPT

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', 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 en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

La figure(22) présente la chaîne de conversion photovoltaïque composée par un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le panneau PV et la charge de sortie [34].

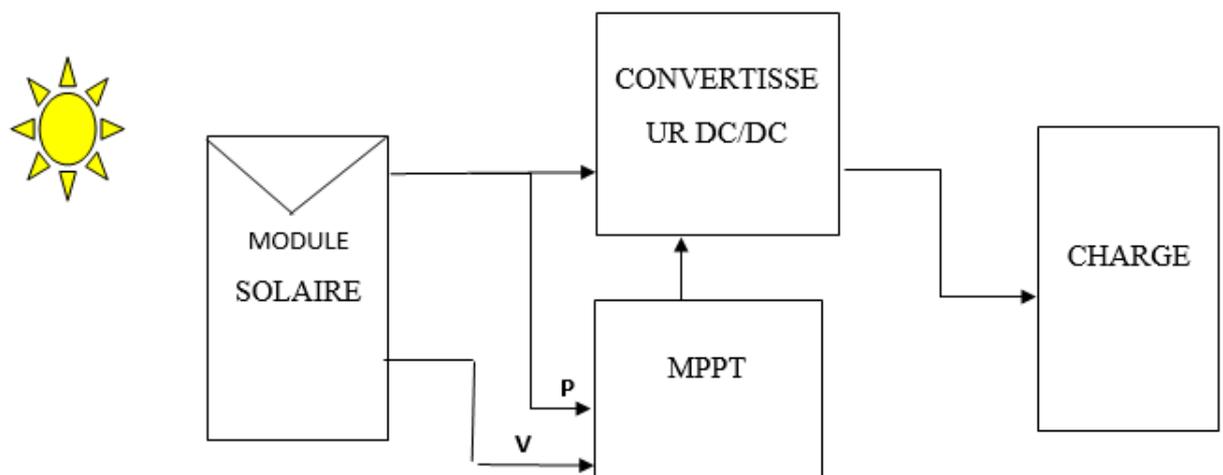


Fig.22 Chaîne de conversion photovoltaïque

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de l'évolution

des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [35].

Actuellement un nombre important de techniques de commande MPPT ont été développés , parmi ces techniques, on peut citer ;

- Perturbation et observation.
- Incrémentation de la Conductance.
- Méthode linéaire.
- L'intelligence artificielle.

2.1 L'algorithme Perturbe & Observe

L'algorithme de perturbation et observation (communément désignée par P&O) est le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cet algorithme a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrément ou la décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le GPV. Selon cette observation, l'algorithme décide sur l'acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation pour P&O sont récapitulés dans le Tableaux.2 [34].

Tableaux.2 : Principe de l'algorithme P&O [3].

Cas n°1	Δv	Δp	Sens de la poursuite	Action de Contrôle
1	+	+	Bon	Incrémenter $v_{ref} = v_{ref} + \Delta V$
2	-	-	Mauvais	Incrémenter $v_{ref} = v_{ref} + \Delta V$
3	+	-	Mauvais	Décrémenter $v_{ref} = v_{ref} - \Delta V$
4	-	+	Bon	Décrémenter $v_{ref} = v_{ref} - \Delta V$

L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement (nuages) [36], [37].

2.2 Conductance incrémentale (Inc-Cond)

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G = I/V$ et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, 'PMP'. Si l'incrément de conductance est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale MPP[37].

Le principal avantage de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement dans des conditions atmosphériques en évolution rapide. Aussi, il réalise des oscillations plus faibles autour du MPP que la méthode P & O [38].

2.3 Méthode linéaire

2.3.1 Méthode de tension en circuit ouvert V_{oc}

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante [36], [39] :

$$V_{MPP} = k_{OC} * V_{OC} \quad (6)$$

Où K_{OC} est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

2.3.2 Méthode du courant de court-circuit I_{CC}

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante [36], [40]:

$$I_{MPP} = k_{CC} * I_{CC} \quad (7)$$

Où k_{CC} est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

2.4 L'intelligence artificielle pour la poursuite du point de puissance maximum

La commande à base de l'intelligence artificielle a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système, pour cela, plusieurs algorithmes de commande intelligente ont été développés, comme celui qui est basé sur la logique floue, réseaux de neurones, ou les deux (Neuro – Floues).

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne FuzzyLogicControl) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non-linéarités [41].

2.5 Les convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [40] :

- Convertisseur dévolteur(ou Buck)
- Convertisseur survolteur (ou Boost)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (Buck-Boost)

Dans ce travail, le convertisseur DC/DC utilisé est de type survolteur (Boost) à découpage.

3 Modèle mathématique du convertisseur survolteur (ou Boost)

C'est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type courant continue (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) comme montre la figure (23) [41] .

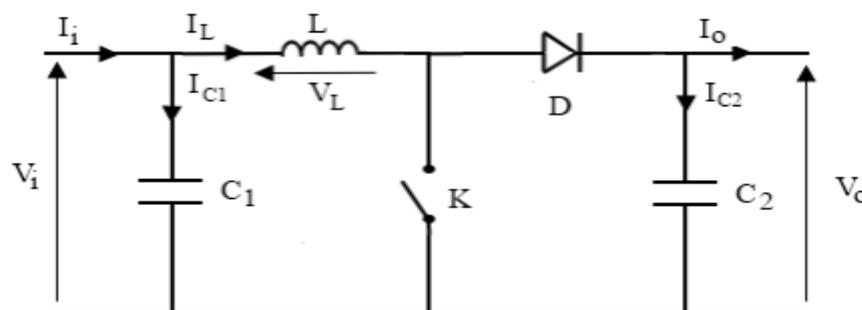


Fig.23 - Schéma électrique d'un hacheur boost [41]

3.1 Modélisation des hacheurs survolteur ou boost

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande de l'interrupteur K. Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur K, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentiel [42], [43] :

Lorsque K est fermé (voir la figure 24):

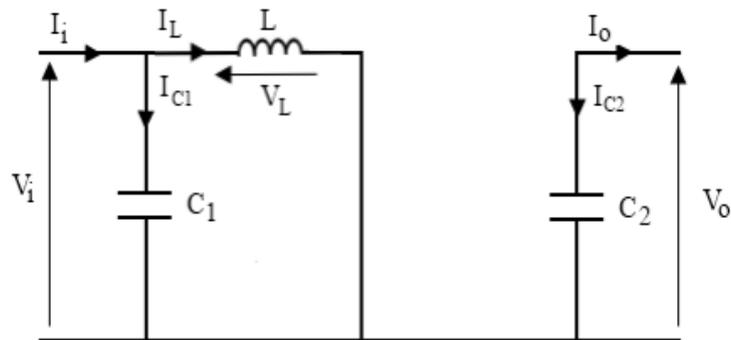


Fig. 24 - convertisseur survolteur (cas ou k fermée)

L'application de loi de Kirchhoff sur le circuit électrique de la figure 24 donne :

$$V_{C1} = L \frac{di_L}{dt} \quad (8)$$

$$0 = C_2 \frac{dv_o}{dt} + i_o \quad (9)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant La figure (25):

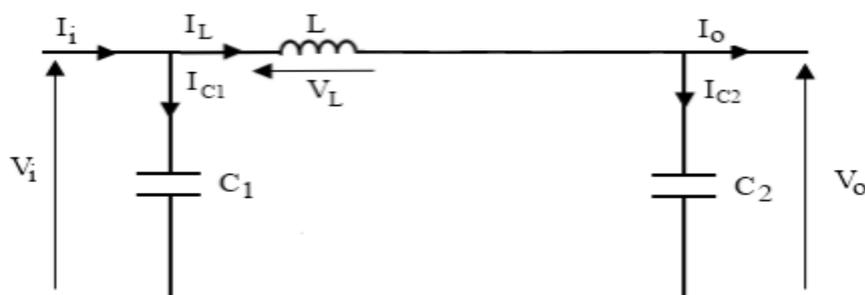


Fig.25 - convertisseur survolteur (cas ou k ouvert)

$$V_i = l \frac{di_l}{dt} + V_o \quad (10)$$

$$I_L = c_2 \frac{dv_o}{dt} + i_o \quad (11)$$

Nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équation unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits

$$vi = l \frac{dil}{dt} + (1 - \alpha)vo \quad (12)$$

$$il(1 - \alpha) = c_2 \frac{dvo}{dt} + io \quad (13)$$

Ou :

V_i : Tension du PV(V)

I_L : Courant dans l'inductance (A)

I_o : Courant de charge (A)

L : Inductance de lissage(H)

C_1, C_2 : Condensateurs de filtrage (F)

α : Rapport cyclique

L'inductance de lissage L , est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source u . le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur .il doit être dimensionné convenablement pour garder une tension constante a ses bornes avec une ondulations tolérée , De même pour la bobine ,elle doit être aussi bien dimensionnée pour garder un courant constant avec une ondulation maximale [42].

3.2 Commande du convertisseur

La commande du convertisseur doit maintenir la tension de sorti de convertisseur à sa référence malgré les demandes de puissance sur la charge et malgré les variations de la tension de PV.

Dans ce travail la commande de ce convertisseur se fait par un contrôle direct du rapport cyclique (VMC : voltage mode control).

3.3 Contrôle direct du rapport cyclique (Voltage Mode Control)

Le schéma représentatif de la boucle de régulation VMC d'un convertisseur DC-DC en utilisant un contrôleur PI (proportionnel, intégral) est donné par la figure (26).

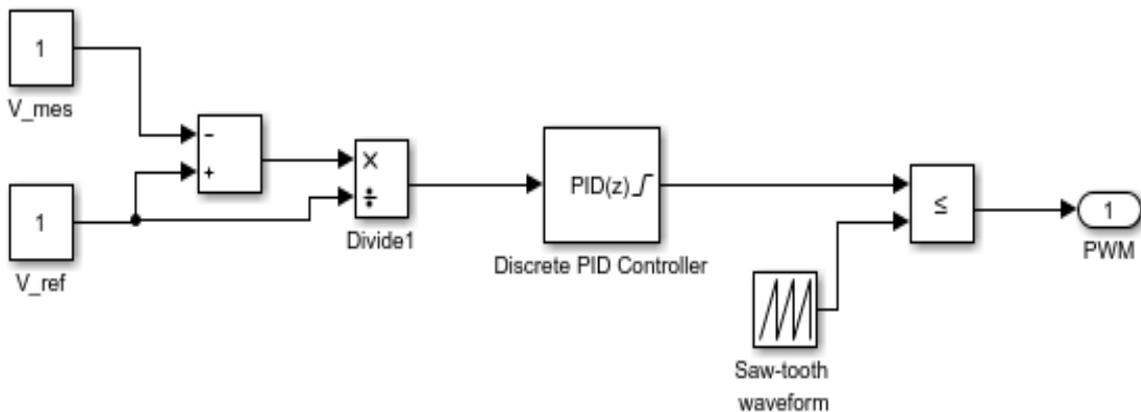


Fig .26- Schéma de la commande par contrôle direct du rapport cyclique.

La grandeur à asservir (en général la tension de sortie) est comparée à une valeur de référence. Le signal d'erreur est ensuite corrigé et comparé à un signal en dents de scie afin d'élaborer le signal de commande.

Cette méthode est assez simple à mettre en œuvre et a l'avantage de ne pas nécessiter de modélisation complexe du convertisseur.

Un régulateur PI est conçu pour augmenter le gain à basses fréquences et de réduire l'erreur en régime permanent entre la tension de sortie désirée et réelle tout en gardant une marge de phase (PM) positive à fréquence choisie [43], [44].

4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes techniques et algorithmes utilisées pour la recherche du point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque ainsi la modélisation d'un convertisseur DC-DC du type élévateur.

Chapitre 4

Contrôleur MPPT à base de la logique floue

1 Introduction

La logique floue vient après la logique booléenne. Ce dernier est basé sur Le principe selon lequel toute proposition ne peut être que vraie ou fausse (tout ou rien), mais la pensée est beaucoup plus complexe et subtile qu'un ensemble de lois rigides, car pour un humain, le mot "rien" n'est pas exactement blanc ou noir, on trouve dans le langage courant assez grand, presque chaud, pas chaud...etc". Ces recommandations doivent donc être élargies logique classique [45], [46].

Les performances que la commande floue peut apporter par comparaison avec les commandes classiques, sont essentiellement dues à la méthode de conception de ces régulateurs. En effet, ces derniers ne nécessitent pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre ils ont besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur les connaissances d'un opérateur qualifié manipulant le système [47].

Ce chapitre a pour but d'étudier un contrôleur MPPT à base de la logique floue, ce contrôleur permet de prédire une tension optimale à partir de deux variables floues d'entrée : la variation de la tension de PV et leur variation de la puissance. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité et la robustesse du contrôle proposé.

2 Bref historique de la Logique Floue

Ce sont les premières approches du concept d'incertitude d'Heisenberg développées par des chercheurs américains dans les années 20 et 30 qui ont conduit à l'apparition de la logique floue. Mais ce n'est qu'en 1965 que les bases théoriques de cette logique sont proposées par le professeur Lotfi Zadeh, dans un article intitulé «Fuzzy sets» [50]. Cet automaticien, de réputation internationale, a depuis réalisé de nombreuses avancées théoriques qui ont contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, dans le but de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. Voici l'essentiel de l'historique de la logique floue [48] :

- En 1973, Lotfi Zadeh propose d'appliquer la logique floue pour résoudre les problèmes de réglage.
- En 1975, le professeur Mamdani propose à Londres, une première application très encourageante du réglage par la logique floue et développe une stratégie pour le contrôle d'une chaudière à vapeur.
- En 1978, c'est la société danoise F.L. Smidth-Fuller qui réalise le contrôle d'un four à ciment : c'est la première véritable application industrielle de la logique floue [49].
- En 1983, c'est un épurateur d'eau à commande par la logique floue qui est mis au point avec succès.

- À partir de 1985, la logique floue est introduite par le chercheur M. Suegno au Japon.

Ce type de commande fut alors l'objet des premières réalisations remarquables développées à la fin des années 80 et au début des années 90 telles que le métro Sendai(1987) et le lave-linge Aïsaigo Pay Fuzzy de Matsushita (1990).

Depuis, la logique floue connaît au Japon un véritable essor dû au fait que les sociétés Japonaises ont vite compris ses avantages, à la fois techniques et commerciaux [50], [51] :

- Facilité d'implantation.
- Solutions de problèmes multi variables complexes.
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes.
- Possibilité d'intégration du savoir-faire de l'expert.

3 Principe de La logique floue

Afin de connaître le principe fondamental de la logique floue, on introduit un exemple simple, celui de la classification des personnes en trois ensembles [52] :

« jeune », « entre deux âges » et « âgé »

Pour le cas de la logique classique qui admet deux valeurs 0 ou 1, la classification pourrait se faire comme dans la figure (27). Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans appartiennent à l'ensemble jeune et toutes les personnes âgées de plus 50 ans sont considérées comme appartenir à l'ensemble « âgé ».

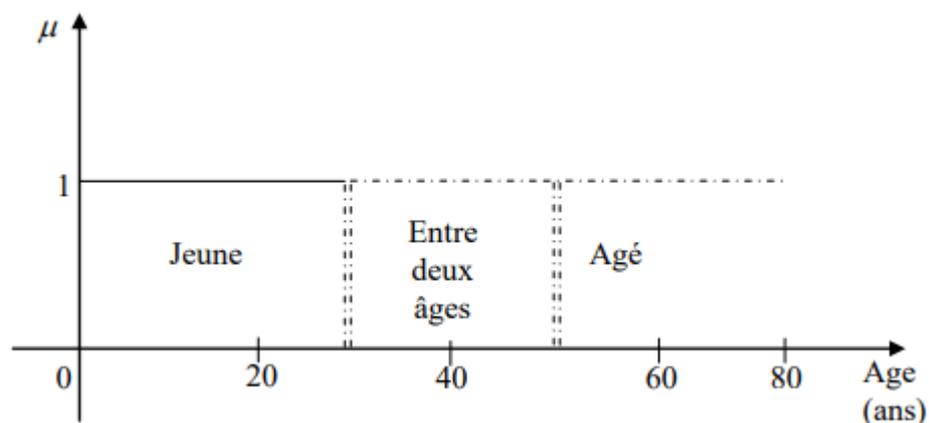


Fig . 27 - Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique [53]

Cependant cette classification n'est même pas logique, car elle ne prend pas en considération des personnes situées dans la zone « entre deux âges » [53], et en réalité un tel passage ce fait progressivement et individuellement.

Il est donc possible de trouver une autre classification pour l'exemple précédant à l'aide

de la logique floue dont leurs limites ne varient pas soudainement mais progressivement comme le montre la figure (28).

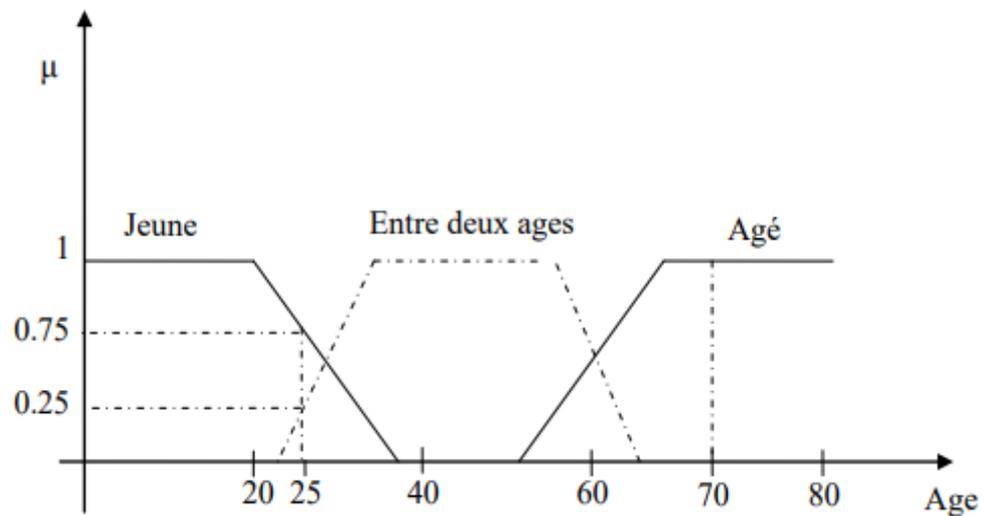


Fig. 28 - Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue [53]

A partir de la figure (28) une personne de 25 ans appartient à l'ensemble « jeun » avec une valeur de la fonction d'appartenance $\mu = 0.75$ et à l'ensemble « entre deux âges » avec $\mu = 0.25$ par contre, une personne de 70 ans appartient avec une valeur $\mu = 1$ à l'ensemble « âgé » [53].

4 Avantages et inconvénients de la logique floue

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et des inconvénients [47] :

4.1 Avantages de la logique floue

- La non-nécessité d'une modélisation du système à réglé.
- La possibilité et la facilité d'implémenter des connaissances de l'opérateur de processus (intégration de l'expertise humaine sous forme de règles simples).
- Une solution efficace pour des problèmes complexes (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes de modélisation.

4.2 Inconvénients de la logique floue

- Manque de directives précises pour la conception du régulateur (choix des fonctions d'appartenance, nombre des sous-ensembles flous, l'univers de discours, ...etc).
- Aucune méthode formelle pour l'ajustement.

- Les performances dépendent de l'expertise.
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse, ...etc.

5 MPPT par logique floue

La logique floue s'avère une méthode simple pour réaliser la commande d'un système complexe et hautement non linéaire. De plus, il n'est pas nécessaire de connaître la modélisation du système à contrôler. Il est possible de diviser le principe de la logique floue en trois grandes phases (figure 29) : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification [54], [55], [56], Dont les étapes de conception d'un régulateur flou dans l'environnement SIMULINK sont détaillées en annexe B.

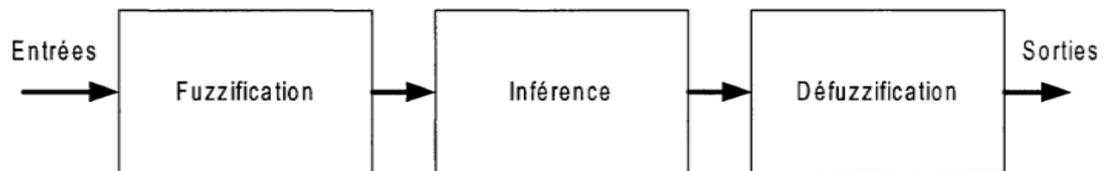


Fig .29- Phases de la logique floue [58]

Dans cette étude, les variables floues d'entrée sont : la variation de la tension ΔV de PV et leur variation en puissance ΔP , le variable de sortie est : la variation de la tension désirée ΔV_{ref} .

On attribue à ces variables trois ensembles flous (P, Z, N), signifient respectivement une variation positive, une variation nulle (ou zéro) et une variation négative dont chaque variable (ΔV , ΔP ou ΔV_{ref}) appartient toujours à deux fonction d'appartenance les fonctions d'appartenance peuvent prendre n'importe quelle forme . dans notre cas elle sont triangulaires, principalement pour des raisons de simplification des calculs.

La fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées où Chaque ensemble flou est caractérisé par un degré d'appartenance μ qui représente le degré de vérité de la fonction d'appartenance comme montre les figures suivantes :

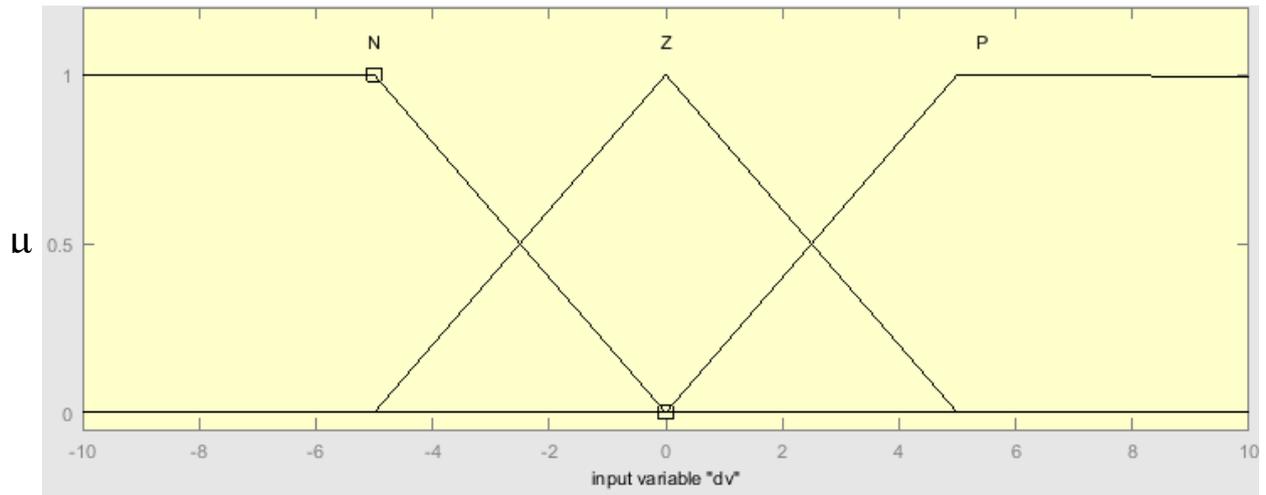


Fig. 30- Fuzzification de ΔV .

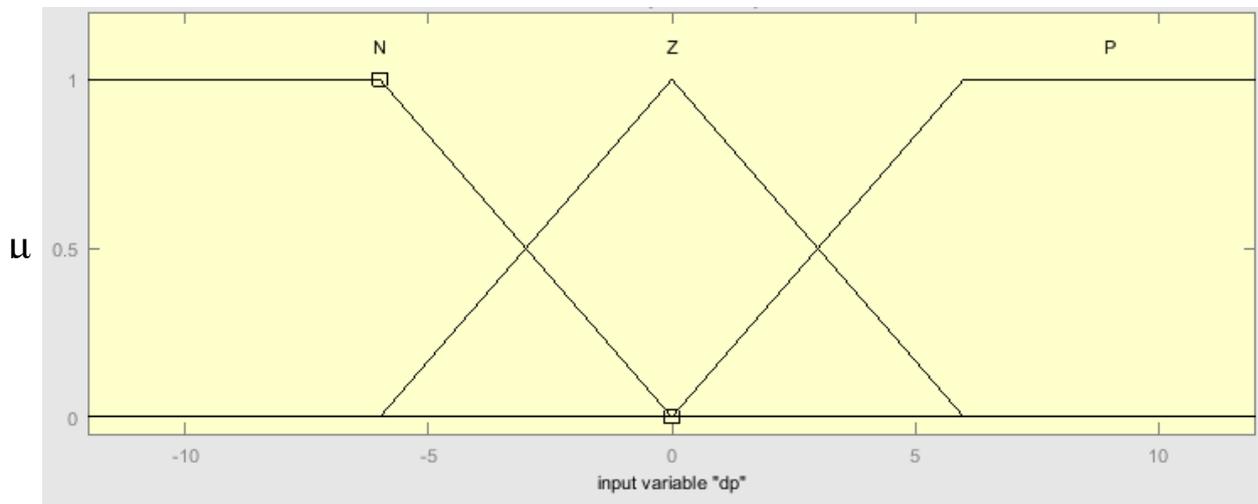


Fig. 31- Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée du système

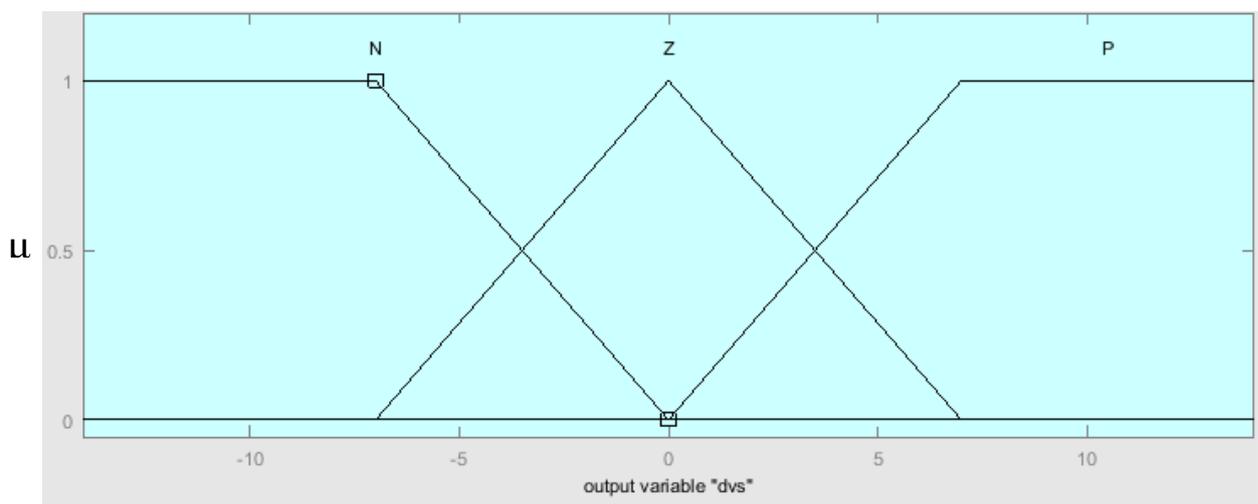


Fig.32- La fonction d'appartenance de la variable de sortie du système

On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques (ΔV , ΔP ou ΔV_{ref}) en variables linguistiques (P, Z, N) qui peuvent être traitées par les inférences.

Le système flou utilisé dans ce travail est de type Mamdani utilisant les entrées [ΔV et ΔP] et la sortie [ΔV_{ref}] comme des données, où l'implication floue et l'opérateur logique ET sont réalisées par la formation du minimum et l'opérateur logique OU est réalisé par la formation du maximum. Le tableau d'inférence (tableau 03) est composé de règles floues, utilisées en parallèles, qui sont tout de type :

Si :

«condition 1» ET «condition 2» Alors «condition3».

Par exemple :

Si une augmentation positive de la tension entraîne une augmentation de la puissance, on continue d'augmenter la tension.

Tableau. 03 - Règles permettant de déterminer les fonctions et les degrés d'appartenance

de ΔV_{ref} .

ΔV_{ref}		ΔP		
		P	Z	N
ΔV	P	P	Z	N
	Z	P	Z	N
	N	N	Z	P

Les conditions étant liées entre elles par un opérateur logique ET, le degré d'appartenance de la fonction d'appartenance qui est la conclusion seront alors égales au minimum des deux degrés d'appartenance des conditions. Les fonctions d'appartenances de sortie sont construites par agrégations des fonctions d'appartenances obtenues par l'ensemble des règles. Par exemple le degré de la fonction d'appartenance de sortie ($\Delta V_{ref} = N$) va être calculé trois fois puisqu' il y a exactement trois règles qui aboutissent à cette conclusion, on calcule donc le maximum entre ces quatre fonction d'appartenance. Pour passer du domaine flou au domaine réel (défuzzification), en calculant la valeur numérique de fonctions d'appartenance de la sortie, on utilise pour ce cas, la méthode du centre de gravité.

6 Résultats obtenus

Afin d'évaluer le temps de réponse de notre système PV associé à un contrôleur de poursuite de puissance, ce dernier est soumis à des variations rapides des conditions de l'ensoleillement. Dans ce cas la température est maintenue constante à 25°C et on augmente l'ensoleillement de 600 à 1000W/m² (figure 33) dans un temps très court ce qui est en pratique rare sauf pour les stations mobiles (véhicule solaire) lors de leurs sorties d'un tunnel par exemple.

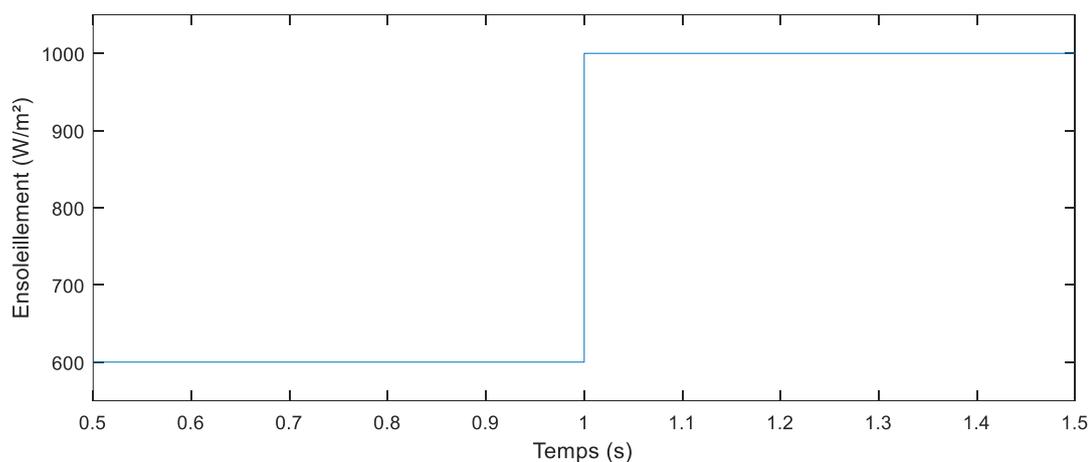


Fig.33- La variation de l'éclairement

La Figure (34), donne la courbe de la puissance de PV optimisée par le dispositif MPPT flou comparée à la courbe de la puissance optimale trouvée sur la caractéristique puissance en fonction de la tension de PV.

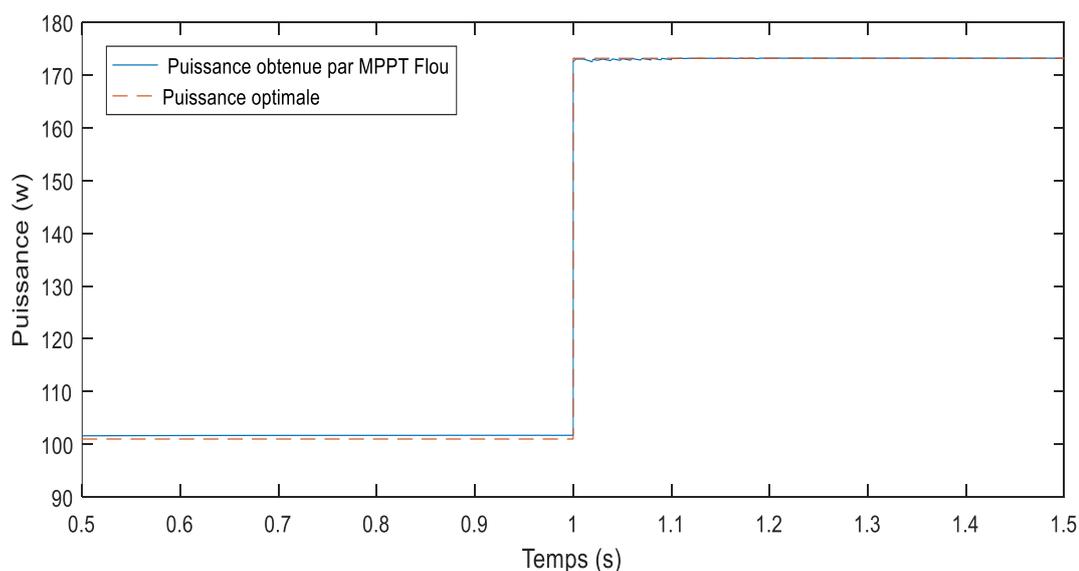


Fig. 34 -Puissance optimale et maximisée par le contrôleur MPPT

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur statique (à l'état permanent) très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT) d'un PV grâce à un algorithme basé sur la logique floue. Les résultats obtenus montrent le bon comportement, l'efficacité et la robustesse du contrôleur proposé.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but d'étudier la modélisation et la simulation d'un panneau solaire photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC.

Dans le premier chapitre, et après un exposé sur les différentes technologies d'énergie solaire photovoltaïque, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est présenté.

Puis nous avons présenté, dans le deuxième chapitre, la modélisation et la simulation en statique d'un panneau solaire photovoltaïque ainsi une étude paramétrique sur la caractéristique électrique de PV.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les différentes techniques utilisées pour suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque ainsi la modélisation d'un convertisseur DC-DC du type élévateur.

Le convertisseur DC/DC, utilisé a pour but d'adapter la tension de PV à la tension de charge et utiliser aussi pour la commande de bloc MPPT. Pour cela un algorithme à base de la logique floue a été développé dans le chapitre quatre.

Les résultats de simulation trouvés, montrent l'efficacité et la robustesse du contrôleur MPPT proposé.

Le travail fait partie des axes de recherche d'une équipe et comme perspectives nous avons pour but d'implanter un contrôleur floue sur une carte Arduino.

Bibliographie

- [1] A .MEHARRER ,2012. modélisation, optimisation et contrôle des systèmes hybride, eolienne pile à combustible, thèse de doctorat université Mohamed Boudiaf, Oran .
- [2] Salim Djriou, 2011. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone ,, thèse magistère, université Ferhat Abbas-Sétif.
- [3] Marwan JARKAS, 2013. Cour des énergies renouvelables.
- [4] Atmania Hanane.,2015. La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie, cas de la photovoltaïque, mémoire de Magister, Université d'Oran -2- Mohamed Ben Ahmed ;
- [5] Zidane Nourredine., 2014. Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Energies Renouvelables, mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas -Setif 1
- [6] définition | énergie solaire |(EdFFrance)
<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-solaire> .
 Date de la dernière consultation du site: 5 Mars 2022
- [7] Abdelhamid Lilia., 2012. Contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens - évaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement, thèse doctorat Université Hadj Lakhdar - Batna
- [8] Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, Ministère de l'énergie et des mines, Mars 2011, p 10
- [9] image chauffe-eau solaire | les énergies renouvelables.
<https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/chauffe-eau-solaire/>
- [10] image centrale thermique à tour | eco sources |
<https://www.ecosources.org/centrale-thermodynamique-tour-solaire-concentration>
- [11] principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque | solaire photovoltaïque |(connaissancedesénergies)
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque8>
 Date de la dernière consultation du site: MARS 2022
- [12] Anatomie d'une cellule photovoltaïque, 2013. |Futura sciences|
<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/5/>
 Date de la dernière consultation du site:15 MARS 2022
- [13] A. Akham,B. soulef, 2021. Modélisation, simulation et commande d'un système Photovoltaïque , Mémoire de master, université science et technologie Tissemsilet
- [14] LAHLOU Samir., juin 2016, Détection et localisation des défauts convertisseurs statiques dans un système Photovoltaïque raccordé au réseau moyenne tension, mémoire de master, Université M'Hamed

BOUGARA – Boumerdes

[15] technologie des cellules photovoltaïque | panneaux photovoltaïque | (iutenligne)
https://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/sivert/panneaux-photovoltaiques/3_diffrentes_technologies_de_panneaux_photovoltaiques.html

Date de la dernière consultation du site:16 mars 2022

[16] image de cellule monocristalline|

<https://guide.devisconseil.com/difference-monocristallins-polycristallins.html>

Consulté le 16 MARS 2022

[17] image de cellule polycristallin<https://www.jade-technologie.com/panneau-solaire-polycristallin-2/>

Consulté le 16 MARS 2022

[18] K. Ouabdelkader, H. MERSEL ,2015. Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau» Mémoire de fin de cycle, université de Bejaïa

[19] B.Djaber, B.sedik, 2015. développement des modèles mathématique d'un générateur photovoltaïque que défectueux ;mémoire de master Université des Sciences et de la Technologie Houari BoumedieneAlger

[20] exemple d'application des cellules PV

<https://www.hisour.com/fr/application-of-photovoltaics-39479/>

consulté le 17 MARS 2022

[21] Système d'énergie solaire pour les télécommunications

<https://www.dsnsolar.com/info/solar-power-system-for-telecommunications-50226954.html> consulté le 18 MARS 2022

[22] Schéma d'un système de pompage photovoltaïque|ss-asso| mise en ligne (s.d)

<https://www.ssf-asso.org/systemes-de-pompage-photovoltaique/>

Consulté LE 19 MARS 2022

[23] Mélodie DE L'EPINE, Anne-Claire FAURE et Cécile MIQUEL 2019 sur la base du guide « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau - guide de recommandations à destination des maîtres d'ouvrage »010838 ISBN : 979-10-297-1324-8

[24] Photovoltaïque intégré dans les bâtiments en Allemagne |en ligne (s.d)

<https://www.actu-environnement.com/ae/news/allemande-photovoltaique-europe-eutobserver-31297.php4>

consulté le 19 MARS 2022

[25] Applications de l'énergie solaire photovoltaïque <https://www.etudier.com/dissertations/Applications-De-l'Énergie-Solaire-Photovoltaïque/494333.html> .

Date de la dernière consultation du site:02 Avril 2022

[26] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/nos-services/autoconsommation-solaire/pourquoi-choisir->

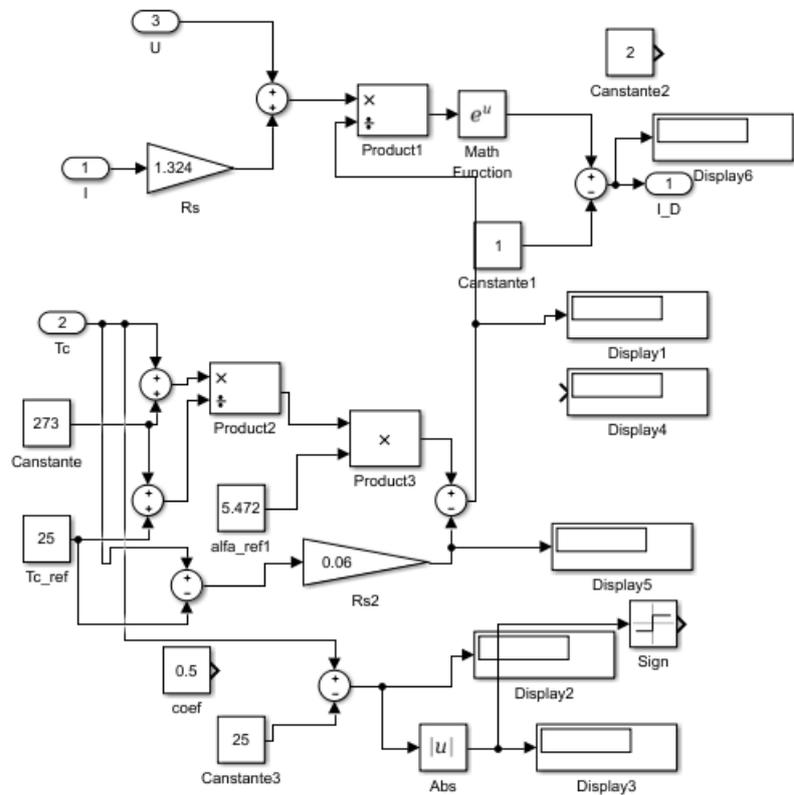
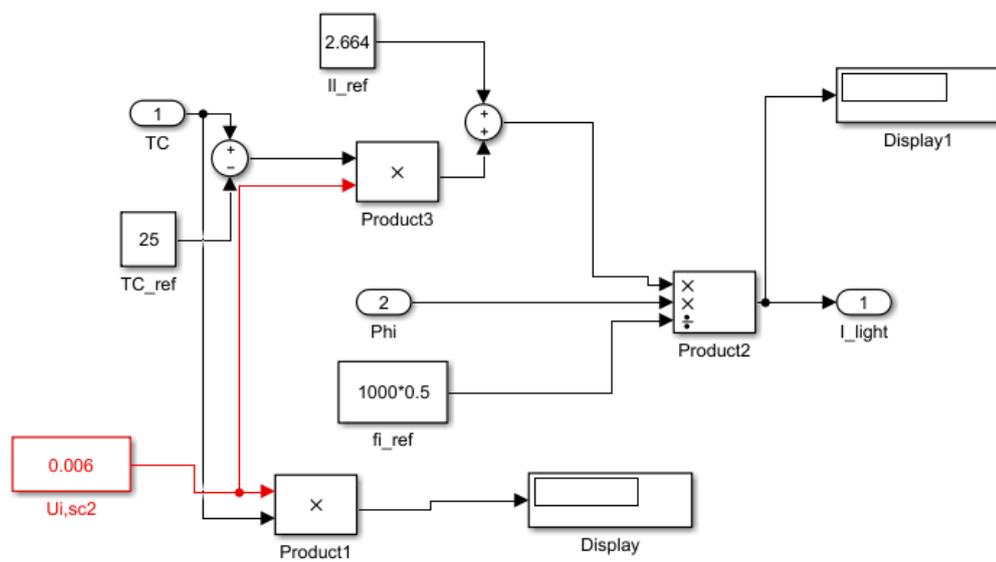
autoconsommation/maison-autonome-en-energie

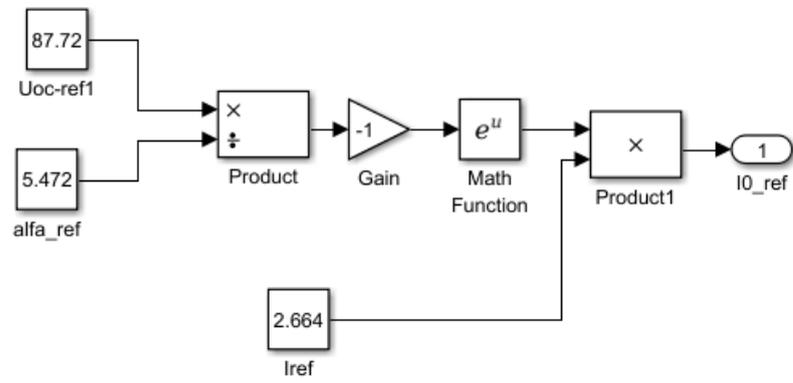
Consulté le 5 MAI 2022

- [27] J. Knaack, A. Meister ,2016, Normes et standards relatifs au photovoltaïque en Tunisie https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/Photovol_Tunesien_6_4.pdf, consulté le 10 mai 2022
- [28] k BOULHARES, CH. TRAKET 2018. Etude Pratique et Dimensionnement d'un Système d'Eclairage Public Photovoltaïque Autonome Cas d'étude, mémoire de master université d'Adrar
- [29] éclairage public photovoltaïque
<https://www.energi solare100.com/fr/kit-solaires/kit-illuminazione-solare/eclairage-public-routier-solaire>
 consulté le 6MAI 2022
- [30] S.Lalouni 2005. Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie, Mémoire de magister, Université de Bejaia,
- [31] P. Borne ,1992. Modélisation et identification des processus, livre, édition technique,
- [32] Marcelo GradellaVillalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto RuppertFilho, 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays», IEEE Transactions on power electronics, vol.24, no.5
- [33] CaishengWang,2006. modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems» doctoral thesis. Montana state university Bozeman, Montana
- [34] A. BAHRI, A. Thameur,M. MORDJAOUI,B .BECAR, B. Skander2020« Etude comparative des algorithmes d'optimisation MPPT pour un système photovoltaïque » The national conference on EnergySystems, Environment, Plasma and Materials, Laboratory, University of Ghardaia.
- [35] BENADEL Faiza ,2015. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV »mémoire de master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [36] BELKAID Abdelhakim , 2015. Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome» thèse doctorat université ferhatabbas - setif
- [37] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, and M. Abid, 2014 "Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque", J. Ren. Energies, vol. 17, no. 3, pp. 435
- [38] KARAMI, Nabil, MOUBAYED, Nazih, OUTBIB, Rachid, 2017 General review and classification of different MPPT Techniques. Renewable and SustainableEnergyReviews, vol. 68, p. 1-18.
- [39] AMAOUI Abdenour ,2013 « Optimisation d'une commande MPPT floue par essais particuliers». Mémoire de Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa.
- [40] KORICHI Taki Eddine ,2016. Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique »memoire de master universitemohamedboudiaf - m'sila
- [41] LEQUEU Thierry, 2005 "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP,

- [42] H. Maker, 2008. Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association Pile à Combustible et Supercondensateurs, thèse de doctorat, Université de technologie Belfort Montbeliard .
- [43] OUABDELKADER Katia ,MERSEL Houria 2014. Modélisation contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau » mémoire de master université Abderrahmane mira de Bejaia
- [44] M. BERROUBI Abdennoure, 2016. Commande par mode de glissement des convertisseurs Buck et Boost intégrés dans un système photovoltaïque” Mémoire Master en génie électrique, université M'sila
- [45] K. Latreche- K. Ouadah 2001 « Commande floue par modèle de référence d'un robot rigide à deux degrés de libertés » PFE– Farhet Abbes, Setif
- [46] A. Kaufmann 1992, Initiation élémentaire aux sous-ensembles flous à l'usage des débutants, CPIT, EPFL.
- [47] R.SADOUNI, 2020 Cour « commande intelligente » université de Ghardaïa
- [48] Zadeh, L. A, 1965 “Fuzzy Sets”, Information and Control, 8, 338
- [49] Zadeh, L. A, 1972 “A ationale for Fuzzy Control”, J. Dynamic Syst., Meas and Control, Vol.94, Series G, 3,
- [50] Zadeh, L. A, 1994 “Making the Computers Think Like People”, IEEE Spectrum,
- [51] J. Yan, M. Ryan , J. Power, 1994 “Using fuzzy logic”, Prentice Hall International (UK),
- [52] Antoine Comuéjols, Introduction à la logique floue, AgroParisTech
- [53] L. CHABANI ,A.guedda ,2021 « commande par la logique floue de la machine synchrone a aimants permanents » PFE Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued
- [54] ZADEH, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, volume 8, numéro 3, pages 338-353.
- [56] TAKAGI, T., SUGENO, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, volume SMC-15, numéro 1, pages 116-132.
- [57] A.Pierre , 2006 « rendez-vous de satellite autonome autour de mars par la logique floue » mémoire de maitrise –université de SHERBOOKE CANADA ,

A.1 Les schémas détaillés des blocs A, B et C

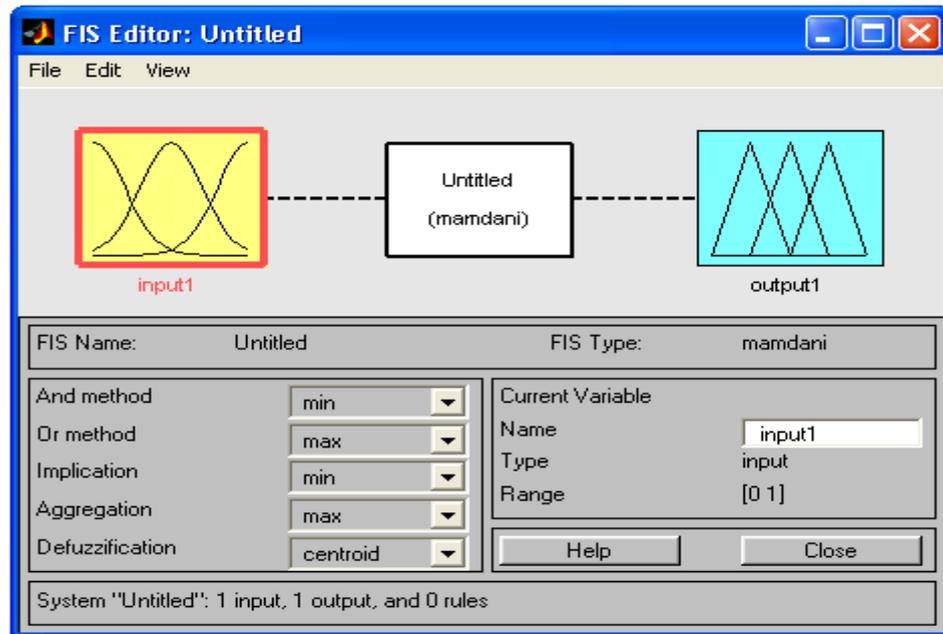
Bloc A : Le courant I_D Bloc B : Le courant I_{light}



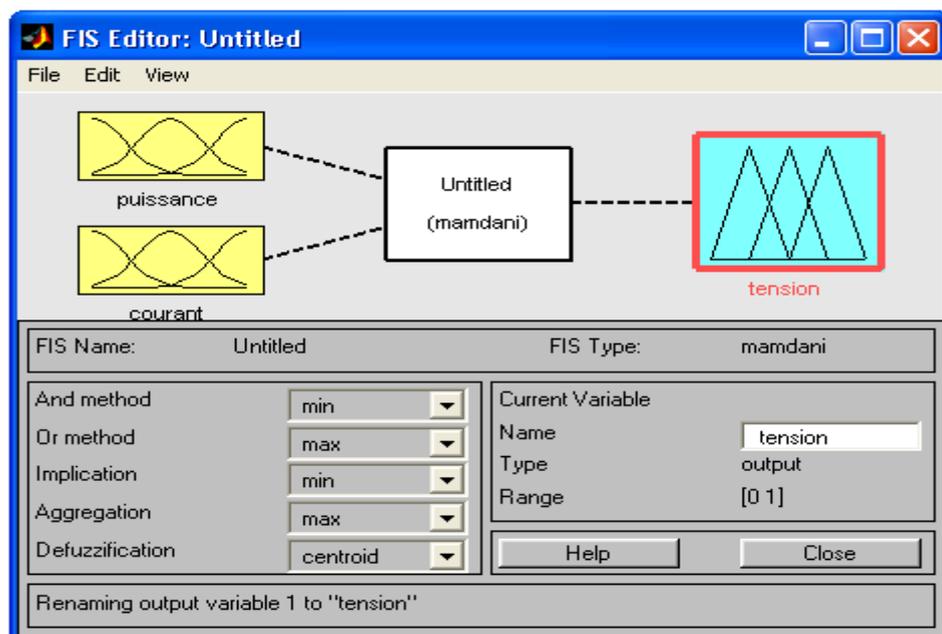
Bloc C : Le courant I_{0_ref}

B. 1 Étapes de conception d'un régulateur flou dans l'environnement SIMULINK

On peut construire ce régulateur à l'aide des interfaces graphiques proposées par la Fuzzy Logic Toolbox ; pour y accéder on tapera **fuzzy** à partir de l'environnement **Workspace** de **MATLAB**; cliquer sur ok Le Fis Editor apparaît (voir la figure suivante) :

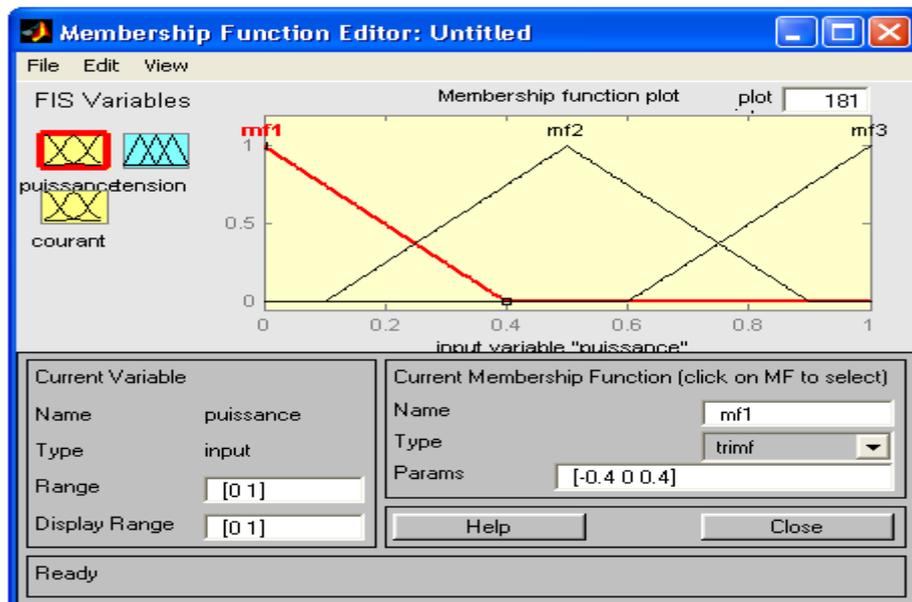


Avec le **Fis Editor** On peut définir les entrées ; par exemple la puissance et le courant, On définit ensuite la sortie par exemple la tension, en choisissant les options **add input** et **add output** du menu **Edit**, (voir la figure suivante).

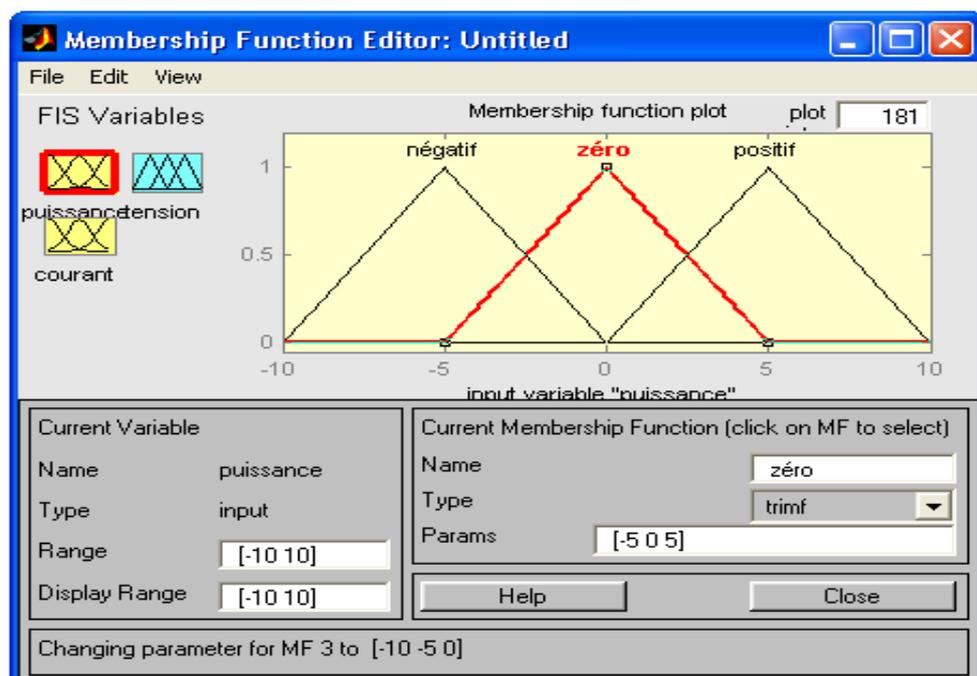


ANNEXE B

Avec double clic sur l'entrée puissance (par exemple), elle apparaît l'interface graphique suivante :



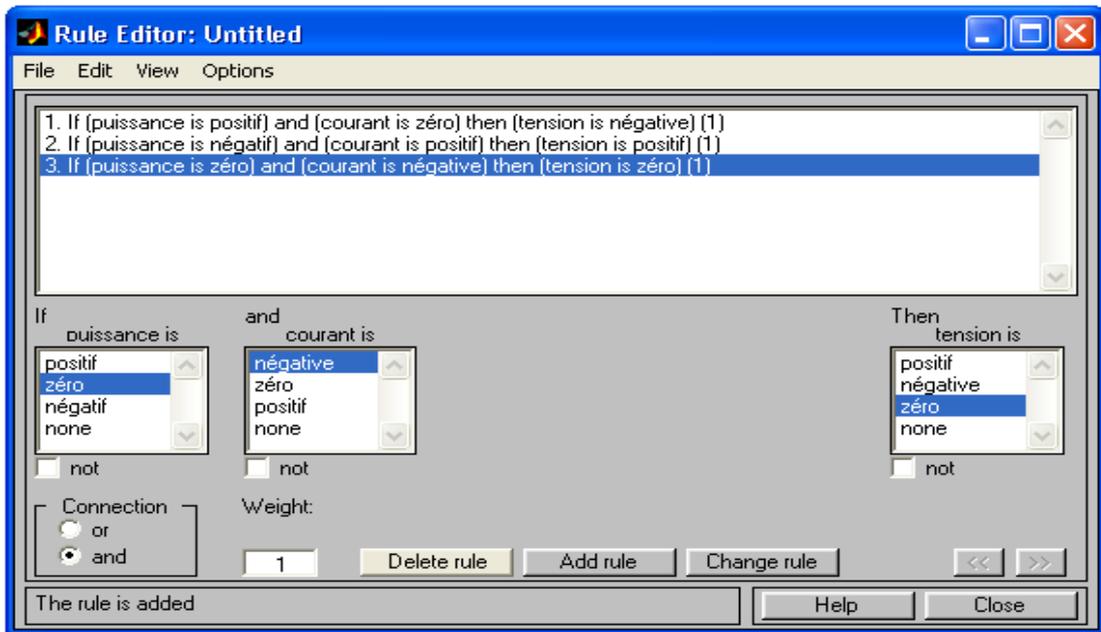
Cette interface permet de définir les ensembles flous et les fonctions d'appartenance de l'entrée Puissance (par exemple) en utilisant l'option **add mfs** du menu édit. On précisera alors le type de ces fonctions : **gaussiennes** ou autre, (par exemple triangulaire ou **trimf**), l'intervalle sur le quel varie cette entrée (par exemple -10 10), le nom de chaque fonction de cet entré (par exemple positif, négatif et zéro) et l'intervalle de variation de ces fonctions (par exemple -5 0 5 pour le zéro), voir la figure suivante :



ANNEXE B

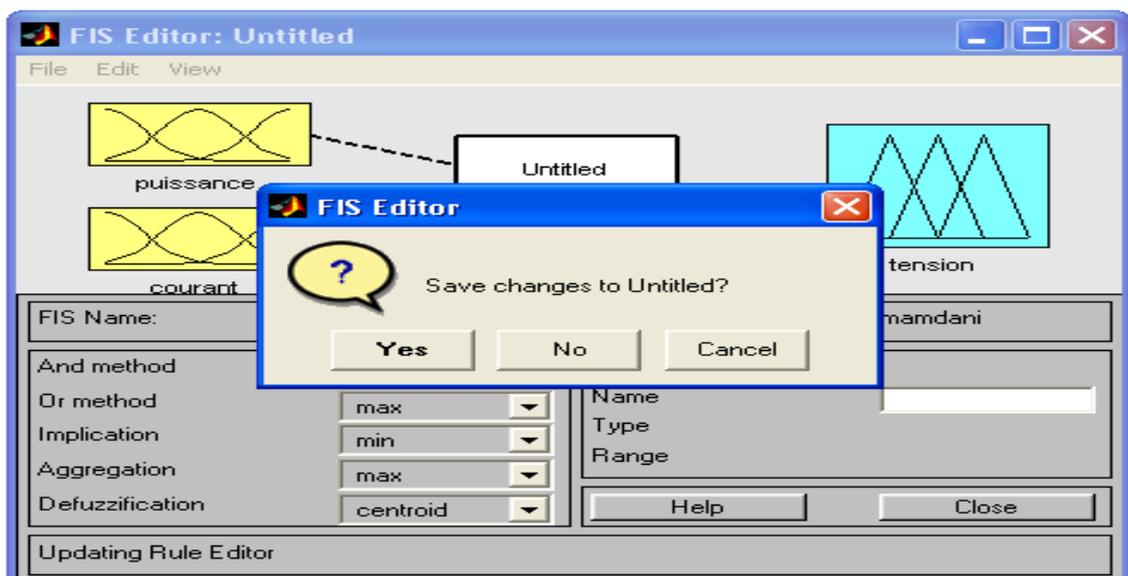
On fait de même pour l'entrée courant et pour la sortie tension, sauf qu'on peut choisir d'autres intervalles, bien sur ça dépend de notre cas !

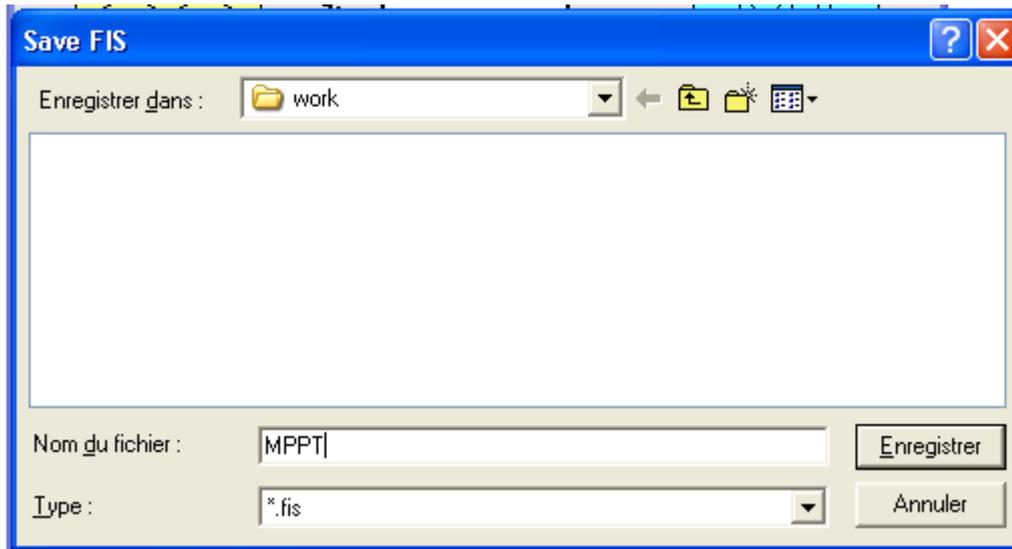
Sur le **Rule Editor** (ou par deux clics sur le graphe en blanc "mamdani") on définit les règles d'inférence liantes les entrées et la sortie du régulateur. On définit à chaque fois la relation logique entre les deux entrées, ensuite on choisit la sortie qu'on va appliquer et on clique sur **add rule** (par exemple) :



Une fois les entrées sont définies, ainsi que la sortie et les règles, cliqué sur **close**, puis sur **Export** de menu **File** puis sur **To workspace**.

Puis sur **Yes**



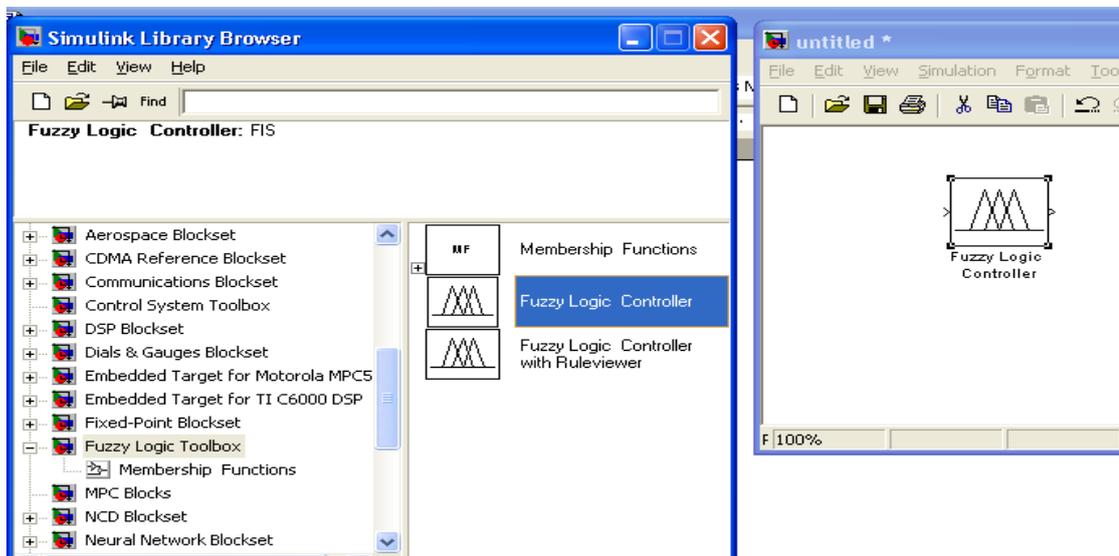


On enregistre notre système d'inférence (le régulateur flou crée) sous le nom **MPPT.fis** (par exemple).

Pour construire ce modèle (contrôleur flou) sur simulink;

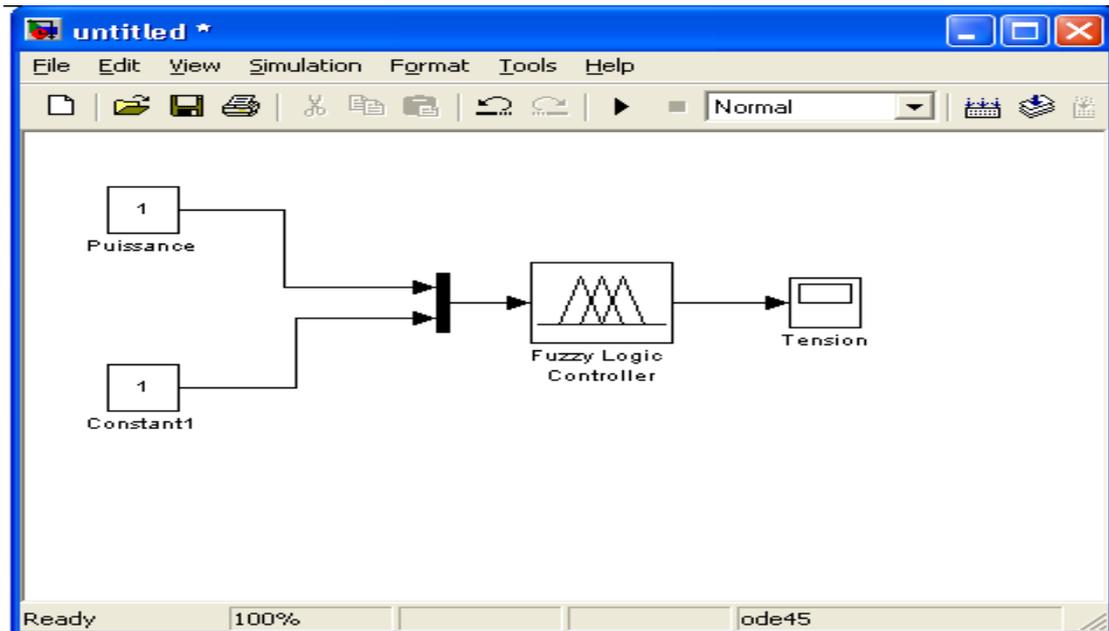
Ouvrir un nouveau fichier dans simulink

Copier le bloc **Fuzzy Logic Controller** de Simulink Library Browser vers le nouveau fichier créé comme montre la figure suivante :



Puis ouvrir le bloc Fuzzy Logic Controller écrire à l'intérieure MPPT.

Pour utiliser le contrôleur flou n'oubliez pas d'ajouter un **multiplexeur** car on a deux entrées comme montre la figure suivante :



Comme vous voyez le contrôleur a été connecté à deux entrées constantes (ce n'est qu'un exemple), mais dans la réalité s'est entées peut-être calculées à partir des autres blocs.

Résumé

Ce travail présente la modélisation et la simulation d'un module photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC de type élévateur. Avant d'aborder à cette modélisation une étude bibliographique sur l'énergie solaire photovoltaïque et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ont été présentée. Ensuite un module photovoltaïque a été modélisé et simulé afin de trouver leur caractéristique électrique.

Enfin nous avons présenté les techniques et les algorithmes utilisées pour le suivre de point de puissance maximum (MPPT), la modélisation et la simulation d'un convertisseur DC-DC, et un contrôleur MPPT à base de la logique floue

Mots clefs : Modélisation, Module photovoltaïque, Convertisseur, logique floue

Abstract

This work presents the modelling and simulation of a photovoltaic module associated with a DC-DC boost converter. Before approaching this modelling a bibliographical study on photovoltaic solar energy the principle of operation of a photovoltaic cell were presented. Then a photovoltaic module was modelled and simulated to find their electrical characteristic.

Finally we presented the techniques and algorithms used to track the maximum power point (MPPT), the modeling and simulation of a DC-DC converter, and a controller based on fuzzy logic

Keywords: Modelling, Photovoltaic module, Boos converter, fuzzy logic

ملخص

يتعلق هذا العمل بدراسة نموذج ومحاكاة وحدة كهروضوئية مرتبطة بمحول DC-DC رافع للجهد.

قبل التطرق لهذه المحاكاة، تم تقديم دراسة نظرية حول الطاقة الشمسية الكهروضوئية، مع عرض مفصل لمبدأ عمل الخلية الكهروضوئية.

ثم تمت دراسة نموذج وحدة كهروضوئية ومحاكاتها للعثور على خاصيتها الكهربائية.

أخيراً قمنا بعرض التقنيات والخوارزميات المستخدمة لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) ، مع نموذج ومحاكاة محول DC-DC، ووحدة تحكم قائمة على المنطق الضبابي

الكلمات المفتاحية: نموذج، الوحدة الكهروضوئية، المحول، المنطق الضبابي

Résumé

Ce travail présente la modélisation et la simulation d'un module photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC de type élévateur. Avant d'aborder à cette modélisation une étude bibliographique sur l'énergie solaire photovoltaïque et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ont été présentée. Ensuite un module photovoltaïque a été modélisé et simulé afin de trouver leur caractéristique électrique.

Enfin nous avons présenté les techniques et les algorithmes utilisées pour le suivre de point de puissance maximum (MPPT), la modélisation et la simulation d'un convertisseur DC-DC, et un contrôleur MPPT à base de la logique floue

Mots clefs : Modélisation, Module photovoltaïque, Convertisseur, logique floue

Abstract

This work presents the modelling and simulation of a photovoltaic module associated with a DC-DC boost converter. Before approaching this modelling a bibliographical study on photovoltaic solar energy the principle of operation of a photovoltaic cell were presented. Then a photovoltaic module was modelled and simulated to find their electrical characteristic.

Finally we presented the techniques and algorithms used to track the maximum power point (MPPT), the modeling and simulation of a DC-DC converter, and a controller based on fuzzy logic

Keywords: Modelling, Photovoltaic module, Boos converter, fuzzy logic

ملخص

يتعلق هذا العمل بدراسة نموذج ومحاكاة وحدة كهروضوئية مرتبطة بمحول DC-DC رافع للجهد.

قبل التطرق لهذه المحاكاة، تم تقديم دراسة نظرية حول الطاقة الشمسية الكهروضوئية، مع عرض مفصل لمبدأ عمل الخلية الكهروضوئية.

ثم تمت دراسة نموذج وحدة كهروضوئية ومحاكاتها للعثور على خاصيتها الكهربائية.

أخيراً قمنا بعرض التقنيات والخوارزميات المستخدمة لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) ، مع نموذج ومحاكاة محول DC-DC، ووحدة تحكم قائمة على المنطق الضبابي

الكلمات المفتاحية: نموذج، الوحدة الكهروضوئية، المحول، المنطق الضبابي