الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE . YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Automatique Des Systèmes

THEME

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque à base de logique floue.

Proposé et dirigé par :

Pr. Hafaifa Ahmed

Préparé et présenté par :

Klalib Abdelmalk.

Remidi Fateh.

2017– 2018.

Remerciements

Notre premier remerciement va à ALLAH sobhanaho wa taala.

Nous tenions à remercier vivement nos encadreurs,

Pr Hafifa Ahmed, pour leur gentillesse,

leur disponibilité et leur contribution générale à l'élaboration de ce travail.

Nous sincères remerciement s'adressent à tous enseignants surtout Dr. HENINI Norreldin et Dr. gasmi Abdelrazak

Nous tenons aussi à adresser nos remerciements aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur et le plaisir d'accepter et juger notre travail.

En fin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de prés ou de loin, au bon déroulement de notre travail et de nos études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A l'âme du défunt de mon cher père sebti , à ma très chère mère malika,

A mon grand père et mes grandes mères

A tous ceux qui portent le nom rmidi

A mes chers sœurs

Mes chers frères ahmed ,riadh ,rabeh ,hamid

Et mon petit frère abdelraouf,

A ma futur famme

Spécialement

A tous mes fidèles amis hossin,saleh,idris,rachid,samir,noureldin,et omar

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux Automatique et système

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A l'âme du défunt de mon cher père bouzid , à ma très chère mère ghzial ;

A mon grand père et mes grandes mères

A tous ceux qui portent le nom kelalib

A mes chers sœurs

Mes chers frères toufik ,rabeh, tayeb, youcef et abdel hamid et zakaria

Et mon petit frère belkacem

A ma futur famme

Spécialement

A tous mes fidèles amis boudjellal, , tayeb et amar Hamouda , bilal, aissa, bougussa , , ali, lesslous, youcef ,besma et fateh mehdi

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux Automatique et système

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment

الملخص

إن الاستطاعة الناتجة عن المولد الكهروالضوئي تتعلق ببعض المتغيرات من بينها شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا الكهروضوئية نضرا للخصائص الكهربائية اللاخطية لهذه الخلايا فان مردود النظام الكهروظوئي يمكن تحسينه باستعمال تقنيات MPPT

إن إتباع نقطة الاستطاعة الأعظمية التي ينتجها المولد الكهروظوئي من بين هده التقنيات توجد منها التقليدية ومن أكثرها استعمالا طريقة الاظطراب والمراقبة ومنها التقنيات الحديثة التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي منها تقنية المنطق الغامض هده المذكرة تقدم مقارنة بين مختلف هده التقنيات لغرض تحليل وتمثيل وتقديم النظام الكهروظوئي الإجمالي ودلك تحت ظروف العمل المتغيرة ولدلك فقد قمنا بتقديم نماذج رياضية لمكونات النظام المولد الكهروظوئي محول تيار مستمر تيار مستمر

النتائج المتحصل عليها باستعمال لغة البرمجة أثبتت على العموم إن الفعالية السكونية والديناميكية للمنطق الغامض في إتباع نقطة الاستطاعة الأعظمية للمولد الكهروظوئي أحسن من الطريقة التقليدية طريقة الإظطراب والمراقبة

كلمات مفتاحية الخلايا الكهروظوئية الألواح الكهروظوئية الفعالة إتباع نقطة الاستطاعة الأعظمية المنطق الغامض

Résumé :

La puissance de sortie d'un GPV dépend d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. 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 à base des techniques MPPT. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode MPPT floue. Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab Simulink, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT flou sont bien meilleures que ceux du contrôleur MPPT conventionnel.

Mots clés : PV, convertisseur DC-DC, MPPT. P&O, logique floue.

Abstract:

The output power of a GPV depends on a number of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc. Because of the highly nonlinear electrical characteristics of PV cells and their associations, the system performance can be improved by PV based solutions MPPT techniques. There are methods MPPT conventional commonly used, namely the perturbation and observation (P & O) and the method of fuzzy MPPT. This thesis presents a comparative study of different techniques MPPT to analyze, simulate, and evaluate the overall system PV power under varying operating conditions. To do the mathematical models of system components PV (GPV, DC-DC converter, load) have been developed. Simulation results, obtained using Matlab Simulink tool, showed that in general the performances of fuzzy controller in maximum power tracking of PV array is much better than the conventional MPPT controller.

Key words: PV, converter -DC, MPPT, P&O, fuzzy logic.

Chapitre I : La logique floue

I.1 Introduction : ..... Error! Bookmark not defined.

I.2 Les sous-ensembles flous..... Error! Bookmark not defined.

I.3 Les variables linguistiques ..... Error! Bookmark not defined.

I.4 Les operateurs flous..... Error! Bookmark not defined.

I.5 Le raisonnement en logique floue..... Error! Bookmark not defined.

I.6 La défuzzification..... Error! Bookmark not defined.

I.7 Conclusions..... Error! Bookmark not defined.

Chapitre II : Modélisation floue de systèmes

II.1 Introduction ..... Error! Bookmark not defined.

II.2. Structure générale et différents types de modèles flous.. Error! Bookmark not defined.

II.2.1 Prémisses de l'antécédent et composition de la base de règles :**Error! Bookmark not defined.**

II.2.2 Inférence et défuzzification dans le modèle linguistique :.....**Error! Bookmark not defined.**

II.3. Le modèle flou de type Takagi-Sugeno : ..... Error! Bookmark not defined.

2.3.1 Inférence dans le modèle Takagi-Sugeno :..... **Error! Bookmark not defined.**

II.4 conclusion :..... Error! Bookmark not defined.

Chapitre III: Les systèmes photovoltaïques

III.1. Introduction..... Error! Bookmark not defined.

III.2 HISTORIQUE..... Error! Bookmark not defined.

III.3. Potentiel solaire ..... Error! Bookmark not defined.

III.3.1. Potentiel solaire extraterrestre..... **Error! Bookmark not defined.**

III.3.1.1. Rayonnement solaire extraterrestre..... **Error! Bookmark not defined.**

III.3.1.2. Temps solaire vrai (TSV) ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.3.1.3. Position du soleil..... **Error! Bookmark not defined.**

III.3.1.4. Géométrie d'orientation : collecteur- faisceau du soleil ....**Error! Bookmark not defined.**

III.3.2. Rayonnement solaire..... **Error! Bookmark not defined.**

III.3.2.1. Spectre solaire..... **Error! Bookmark not defined.**

III.4. Masse d'air ..... Error! Bookmark not defined.

III.5. Semi conducteur..... Error! Bookmark not defined.

III.5.1.Formation de la jonction PN :..... **Error! Bookmark not defined.**

III.5.2.Principe de fonctionnementde la cellule photovoltaique.....**Error! Bookmark not defined.**

III.5.3.type et rendemantdes cellules photovoltaiques..... **Error! Bookmark not defined.**

III.6. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque Error! Bookmark not defined.

III.7. Les systèmes photovoltaïques : ..... Error! Bookmark not defined.

III.7.1. Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique :.....**Error! Bookmark not defined.**

III.7.2. Les systèmes à couplage direct sans batterie : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.8.Secteurs daplication :..... Error! Bookmark not defined.

III.9.Aventages et inconvénients de l'énergie photovoltaique Error! Bookmark not defined.

III.9.1. inconvénients : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.9.2. Aventages : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.10Conclusion: ..... Error! Bookmark not defined.

IV. Chapitre IV : **Modalisation floue à chaine photovoltaïque**

IV.Modalisation floue à chaine photovoltaïque ..... Error! Bookmark not defined.

IV.1.Introduction :..... Error! Bookmark not defined.

IV.2. L'outil Matlab/simulik : ..... Error! Bookmark not defined.

IV.2.1.Simpower..... Error! Bookmark not defined.

IV.3. Système photovoltaïque proposée..... Error! Bookmark not defined.

IV.4.Simulation du générateur photovoltaïque ..... Error! Bookmark not defined.

IV.4.1. Modèle GPV ..... Error! Bookmark not defined.

IV.4.2. Modèle du module photovoltaïque : ..... Error! Bookmark not defined.

IV.4.3. Schéma générateur photovoltaïque dans Matlab :.. Error! Bookmark not defined.

IV.5. Modèle de Simulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT : ..... Error! Bookmark not defined.

IV.6. Simulation de la méthode MPPT :..... Error! Bookmark not defined.

IV.7 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) : 58

IV.8 Structure et simulation de la commande MPPT numérique «P&O»: ..... Error! Bookmark not defined.

IV.8.1 Structure de la commande « perturbation et observation » : Error! Bookmark not defined.

IV.8.2 Simulation de l'algorithme P&O (T et G VARIABLE): 60

IV. 9 Contrôleur MPPT flou : 60

IV.9.1 La Fuzzification :..... Error! Bookmark not defined.

IV.9.2 Méthode d'inférence floue :..... Error! Bookmark not defined.

IV.9.3 La défuzzification :..... Error! Bookmark not defined.

IV.9.4 Structure et simulation de la commande MPPT numérique basé sur la logique floue..... Error! Bookmark not defined.

IV.9..41 Simulation de la méthode MPPT flou : ..... Error! Bookmark not defined.

IV.10. simulation du système photovoltaïque adapté par les d'eaux commandes MPPT (P&O,logique floue) : ..... Error! Bookmark not defined.

IV.10.1 simulation de l'algorithme P&O :..... Error! Bookmark not defined.

IV.10.2 Simulation d'hacheur survolteur :..... Error! Bookmark not defined.

IV.10.3 Résultats de simulation de la commande MPPT floue : ..... Error! Bookmark not defined.

IV.11.Conclusion:..... Error! Bookmark not defined.**8**

Figure 1.1: Fonction d'appartenance caractérisant le sous-ensemble 'bon' de la qualitéé du service ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.2: Représentation graphique d'un ensemble classique et d'un ensemble flou ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.3: Comparaison entre fonction caractéristique d'un ensemble classique et fonction d'appartenance d'un ensemble flou ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.4: Propriétés d'un ensemble flou ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.5: Variable linguistique 'qualité du service' ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.6: Variable linguistique 'qualité de la nourriture' ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.7: Variable linguistique 'montant du pourboire' ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.8: Exemple d'implication floue ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.9: Exemple d'implication floue avec conjonction OU traduite par un MAX..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.10: Exemple d'implication floue en utilisant la matrice des décisions ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.11: Défuzzification avec la méthode moyenne des maxima (MM) **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.12: Défuzzification avec la méthode centre de gravite (COG) . **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.13: Aperçu synoptique d'un système flou ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.14: Ensemble des décisions d'un système flou..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.15: Ensemble des décisions d'un système se basant sur la logique clas- Sique ……. **Error! Bookmark not defined.**

Figure 2.1. Formes typiques représentatives des fonctions d'appartenance..... 20

Figure 2.2. Représentation interne d'un système flou..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-1.Géométrie schématique des rapports terre-soleil..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-2. La position du soleil observée d'après l'origine O. ... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-3.Position du soleil observée d'après l'origine O..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-4. Types de rayonnement solaire reçus au sol..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-6. Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-5. Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné……..4 1

Figure 3-7. Description du nombre de masse d'air. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-8. Génération de la paire électron-trou. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-9. La jonction PN..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-10. Structure d'une cellule photovoltaïque. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-11. Les images de différents types de la cellule photovoltaïque. **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-12. Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [50]..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-13. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-14. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 3-15. Schéma synoptique d'un système photovoltaïque. **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC). [52][53]..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.2 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque....**Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.3 : simulation du module de PV. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.4: bloc de Simulink de générateur photovoltaïque..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.5 : Modèle de sous-système de Simulink de la rangée de photovoltaïque ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.6 : Simulation de convertisseur boost..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.8 : Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge). .....**Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.9 : Organigramme de l'algorithme P&O..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.10 : Simulation de commande p&o..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.11 Le principe de la commande a Logique Floue. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.12 : Régulateur flou adopté..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.13 : Fonctions d'appartenance des variables d'entrées : (a) dP et (b) dV. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.14. Fonctions d'appartenance de la variable de sortie dD. .....**Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.15 : Base de règles sous Matlab. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.16 : Résultat numérique fourni par le bloc d'inférence pou dP = 0.3 et dV= 0.3 et dD=-0.552 ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.17 : Modèle de sous-système de Simulink MPPT flou. . **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.18.variation d'irradiation et température..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.19 : Résultats de simulation du courant de MPPT (P&O). .....**Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.20 : Résultats de simulation de la tension de MPPT (P&O). .....**Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.21 : Résultats de simulation de la puissance de MPPT (P&O). ....**Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.22 : Résultats de simulation du rapport de cyclique..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.23: résultats des simulations de la tension, courant et puissance de la chargePar MPPT (P&O). ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.24 Puissance de sortie P(t) du GPV. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.25 Tension de sortie V(t) du GPV. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.26 Courant de sortie I(t) du GPV. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.27 : Résultats de simulation du rapport de cyclique..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 4.28 : résultats des simulations de la tension, courant et puissance de la charge. **Error! Bookmark not defined.**

Tableau 2.1. Principales t-normes et t-conormes .....**Error! Bookmark not defined.**

Tableau 3-1.Les différents types des cellules avec leur rendement.**Error! Bookmark not defined.**

Tableau 4.1 . caractéristiques du module PV YGE 60 cell série (YL245P-29b)**Error! Bookmark not defined**

Tableau 4.2. : Base de règles. .....**Error! Bookmark not defined.**

Nomenclature

λ : longueur d'onde en mètre.

T : la température absolue en °K.

σ : La constante de Stefan-Boltzmann.

$\mathbf{E_s}$: Éclairement de la surface du soleil.

$\mathbf{E_0}$: Éclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelée constante solaire.

AS : Surface du soleil.

A0T : Surface de la sphère dont le rayon est l'orbite de la terre/soleil.

Λ : Longitude géographique du site ;

Λref : Longitude de référence du TSL

γ : L'altitude.

Ψ : l'azimut.

Λ : longitude.

φ : latitude.

$\boldsymbol{\eta_{stC}}$: Le rendement de la cellule photovoltaïque.

$\mathbf{P_M}$: La puissance produite par le générateur PV.

$\mathbf{E_{stC}}$: L'éclairement absorbé par la cellule.

$\mathbf{S_{cellule}}$: La surface de la cellule [m²].

$\mathbf{I_d}$: Le courant circulant dans la diode.

E : Eclairement (W/m²).

$\mathbf{I_{ph}}$: Le photo courant (A).

$\mathbf{I_{sat}}$: Courant de saturation (A).

$\mathbf{R_p}$: Résistances parallèle shunt(Ω) .

$\mathbf{R_s}$: Résistance série (Ω).

S : la surface du module photovoltaïque (m2)

B ou A : facteur d'idéalité de la jonction.

G : le rapport de cyclique.

T_C : Température de jonction (°K).

G : L'éclairement de référence (1000 W/m²).

T_{ref} : La température de référence (298 °K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

I_{CC} : Le courant de court-circuit (A).

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).

FF : Facteur de forme.

η : Rendement.

N_s: Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max}: Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max}: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

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

k : coefficient de Boltzmann (1.38.10-23 J / K)

Liste des ACRONYMES

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPP : Point de fonctionnement optimal 'Maximum Power Point'.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Curent).

AC: Courant Alternatif (Alternative Curent).

LFC : logique flux.

Eλ : Distribution du rayonnement de corps noirs.

E : Emittance énergétique (éclairement ou ensoleillement).

AM : Masse d'air.

TSL : Temps Standard Local.

TSV : Temps Solaire Vrai.

Introduction générale

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique **[1]**. La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et a développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout a l'environnement, a cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires **[2]**. Les chercheurs se sont orientés vers une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable ». Ces énergies ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu' elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre. Parmi les conséquences de l'utilisation de ces énergies, on peut citer la production d'électricité d'origine solaire par l'effet photovoltaïque (cellules solaires ou photopiles). La conversion de la lumière en électricité (conversion photovoltaïque) se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Le photovoltaïque peut jouer un rôle important dans la transition vers un système d'approvisionnement énergétique durable pour le XXI ème siècle et est susceptible de couvrir une part importante des besoins en électricité de plusieurs pays.

Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible.

Le comportement réel d'un générateur photovoltaïque dépend des changements météorologiques. Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des

cellules solaires ainsi que de la charge utilisée. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie, on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence. Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, une attention particulière a été portée sur la méthode de perturbation et d'observation et la logique floue.

Dans ce mémoire, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT : Perturbation et observation et la logique floue) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure compréhension des performances d'un générateur photovoltaïque et de convertisseur DC/DC adapté par la commande de recherche d'un point de puissance maximale de production.

La constitution de ce mémoire comprend quatre chapitres.

Chapitre I : Le deuxième chapitre est consacré à l'exploration de la technique -logique floue- est Les notions d'ensembles flous, normes et opérateurs

Chapitre II : Ce chapitre présente la modélisation floue des systèmes.

Chapitre III : Dans ce chapitre nous présenterons brièvement un historique des systèmes photovoltaïques. Nous détaillerons ensuite le principe de la conversion PV et la structure de la cellule et les avantages et les Inconvénients .

Chapitre III : Dans le quatrième chapitre, on fait une modélisation et une simulation par MATLAB SIMULINK de chaque élément du système PV réalisé (générateur photovoltaïque convertisseur survolteur (boost) et commande MPPT (P&O, Logique floue). chapitre V on a Et les résultats de simulation pour les d'eaux techniques de MPPT et on a fait une comparaison .

Finalement, on termine par une conclusion générale qui regroupe tous les principaux résultats de ce travail et des perspectives.

I. La logique floue

I.1 Introduction :

La logique floue est une extension de la logique booléenne créé par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degréé dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilitéé très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel. Voici par exemple quelques règles de conduite qu'un conducteur suit, en supposant qu'il tienne à son permis :

Si le feu est rouge...	si ma vitesse est élevée...	et si le feu est proche...	Alors je freine fort.
Si le feu est rouge...	si ma vitesse est faible...	et si le feu est loin...	alors je maintiens ma vitesse.
Si le feu est orange...	si ma vitesse est moyenne...	et si le feu est loin...	alors je freine doucement.
Si le feu est vert...	si ma vitesse est faible...	et si le feu est proche...	alors j'accélère.

Intuitivement, il semble donc que les variables d'entré à l'instar de cet exemple sont

appréciées par le cerveau de manière approximative, correspondant ainsi au degréé de vérification d'une condition de la logique floue.

Afin d'exemplifier chacune des définitions, nous allons concevoir au fil de ce cours d'introduction à la logique floue un systemè d'inférence flou concret dont l'objectif est de décider du pourboire à donner à la fin d'un repas au restaurant en fonction de la qualitéé du service ainsi que de la qualitéé de la nourriture.

I.2 Les sous-ensembles flous :

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques [3]. Par abus de langage, suivant les us de la littérature, nous utiliserons indifféremment les termes sous-ensembles flous et ensembles flous. Les ensembles classiques sont également appelés ensembles nets, par opposition à flou, et de même la logique classique est également appelé logique booléenne ou binaire.

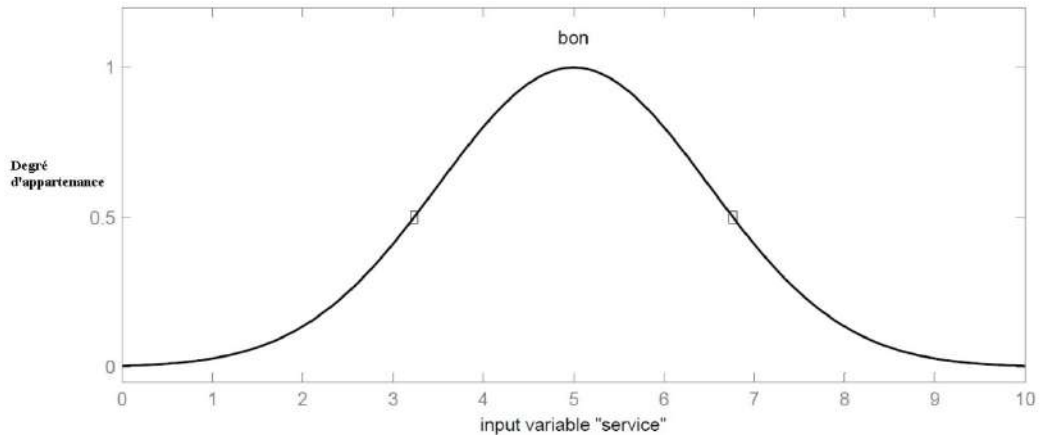


Figure 1.1: Fonction d'appartenance caractérisant le sous-ensemble 'bon' de la qualité du service

La figure 1.1 montre la fonction d'appartenance choisie pour caractériser le sous-ensemble 'bon' de la qualité du service.

Définition 1 :

Soit X un ensemble. Un sous-ensemble flou A de X est caractérisé par une fonction d'appartenance $f^a : X \rightarrow [0, 1]$.

Note : cette fonction d'appartenance est l'équivalent de la fonction caractéristique

D'un ensemble classique.

Dans notre exemple du pourboire, il nous faudra ré définir des fonctions d'appartenance pour chaque sous-ensemble flou de chacune de nos trois variables :

– Input 1 : qualité du service. Sous-ensembles : mauvais, bon et excellent.

– Input 2 : qualité de la nourriture. Sous-ensembles : exécrable et délicieux.

– Output : montant du pourboire. Sous-ensembles : faible, moyen et élevé.

La forme de la fonction d'appartenance est choisie arbitrairement en suivant les conseils de l'expert ou en faisant des études statistiques : formes sigmoïde, tangente hyperbolique, exponentielle, gaussienne ou de toute autre nature sont utilisables.

La figure 1.2 montre graphiquement la différence entre un ensemble classique et l'ensemble flou correspondant à une nourriture délicieuse.

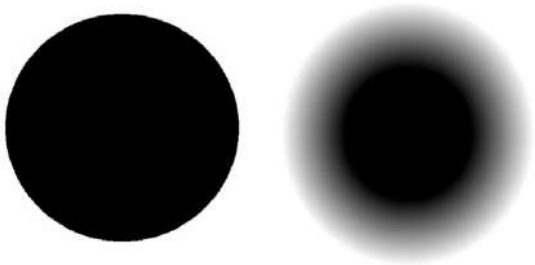


Figure 1.2: Représentation graphique d'un ensemble classique et d'un ensemble flou

La figure 1.3 compare les deux fonctions d'appartenance correspondant aux ensembles précédents.



Figure 1.3: Comparaison entre fonction caractéristique d'un ensemble classique et fonction d'appartenance d'un ensemble flou

Pour pouvoir définir les caractéristiques des ensembles flous, nous redéfinissons et

Étendons les caractéristiques usuelles des ensembles classiques.

Soit X un ensemble, A un sous-ensemble flou de X et μ_A la fonction d'appartenance le caractérisant.

Définition 2.

La hauteur de A, notée h(A), correspond a la borne supérieure de l'ensemble D'arrivée de sa fonction d'appartenance : h(A) = $h(A) = \sup\{\mu_A(x) | x \in X\}$.

Définition 3.

A est dit normalisés si et seulement si h(A) = 1. En pratique, il est extrêmement Rare de travailler sur des ensembles flous non normalises.

Définition 4.

Le support de A est l'ensemble des éléments de X appartenant au moins un peu à A. Autrement dit, c'est l'ensemble supp (A)$\{x \in X | \mu_A(x) > 0\}$

Définition 5.

Le noyau de A est l'ensemble des éléments de X appartenant totalement à A. Autrement dit, c'est l'ensemble $noy(A)\{x \in X | \mu_A(x) = 1\}$Par construction, noy(A) ⊆ supp(A).

Définition 6.

Une à-coupe de A est le sous-ensemble classique des éléments ayant un degré D'appartenance supérieur ou égal à a :

$$\alpha_coupe\ \{x \in X | \mu_A(x) \geq a\}.$$

Une autre fonction d'appartenance pour un pourboire moyen sur lequel nous avons Fait figurer les propriétés es précédentes est présentée sur la figure 1.4.

Nous remarquons que si A était un ensemble classique, nous aurions simplement supp(A) = noy(A) et h(A) = 1 (ou h(A) = 0 si $A = \emptyset$).

Nos définitions permettent donc bien de retrouver les propriétés usuelles des ensembles classiques. Nous ne parlerons pas de la cardinalité car nous n'utiliserons pas cette notion dans la suite de Ce cours.

I.3 Les variables linguistiques :

Le concept de fonction d'appartenance vu précédemment nous permettra de définir Des systèmes flous en langage naturel, la fonction d'appartenance faisant le lien entre Logique floue et variable linguistique que nous allons définir a présent.

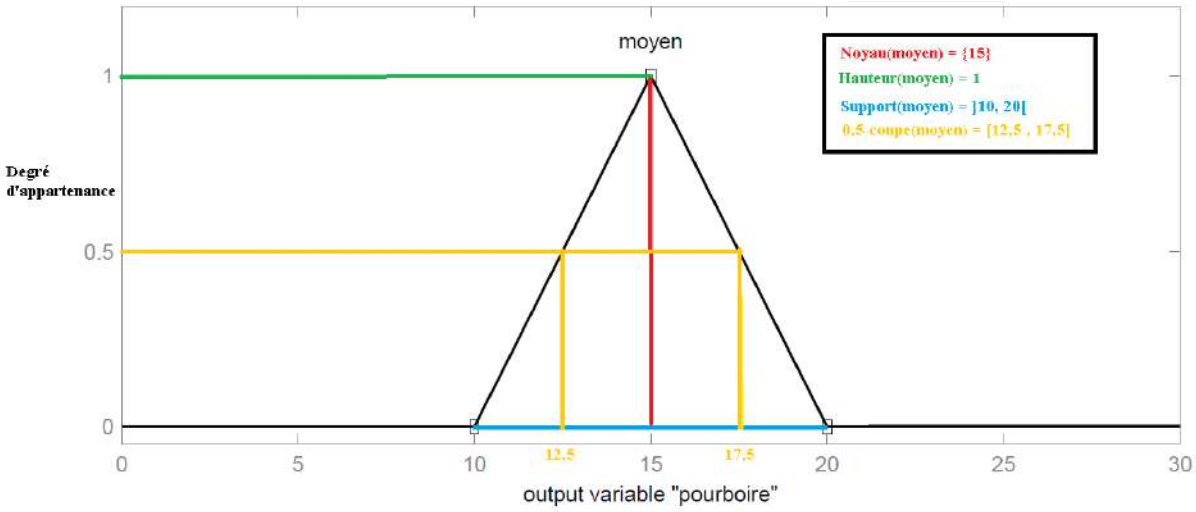


Figure 1.4: Propriétés d'un ensemble flou

Définition 7.

Soit V une variable (qualité du service, montant du pourboire, etc.), X la plage

De valeurs de la variable et $T_v$un ensemble fini ou infini de sous-ensembles flous.

Une variable linguistique correspond au triplet (V;X; TV).

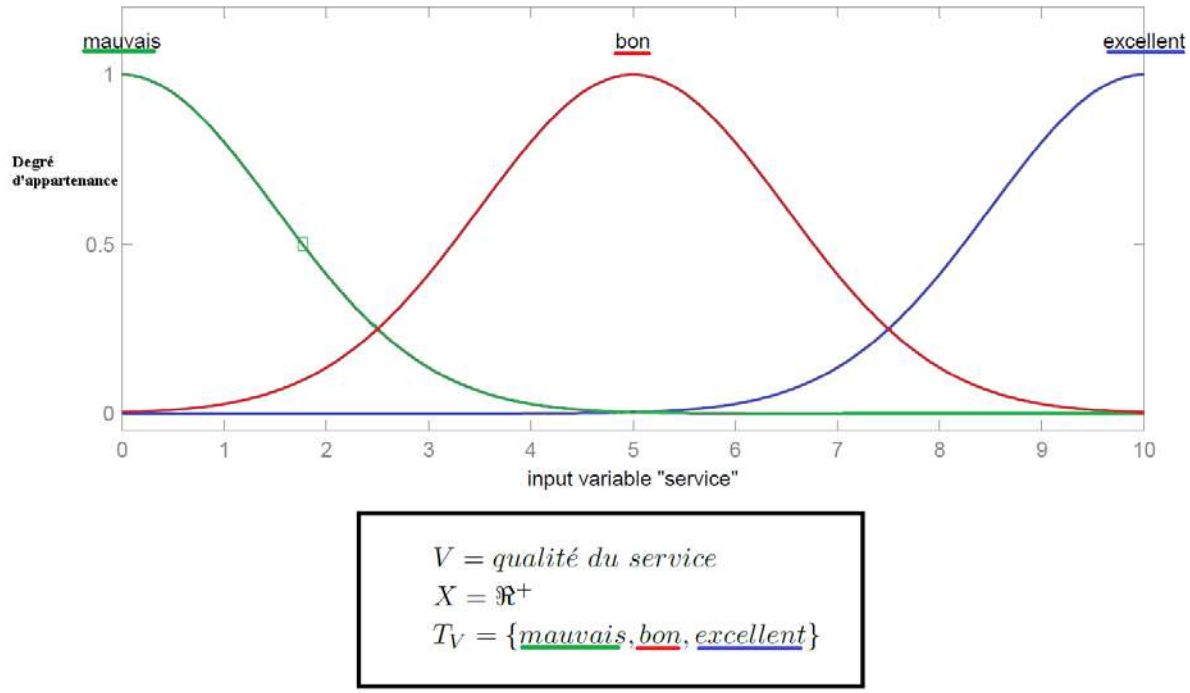
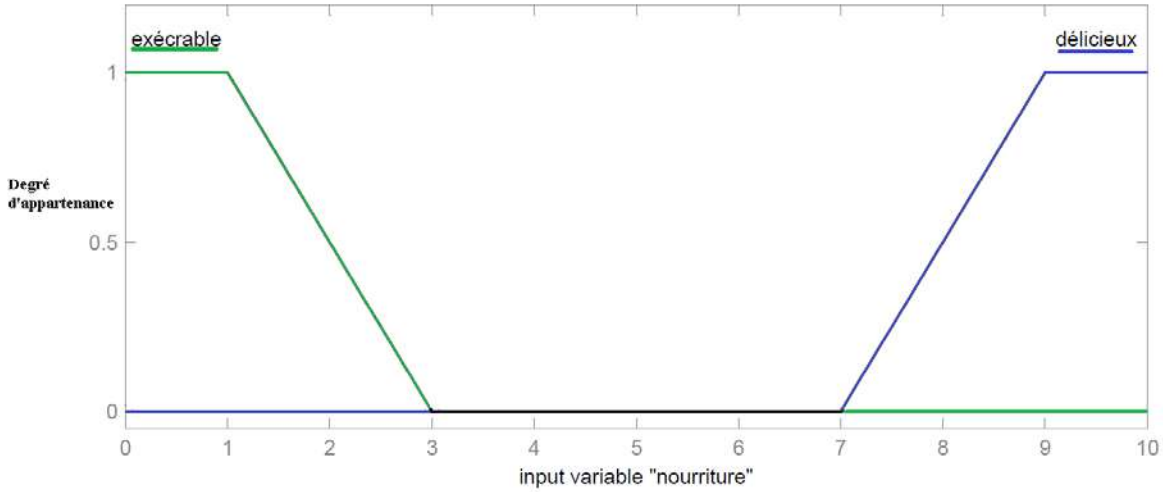
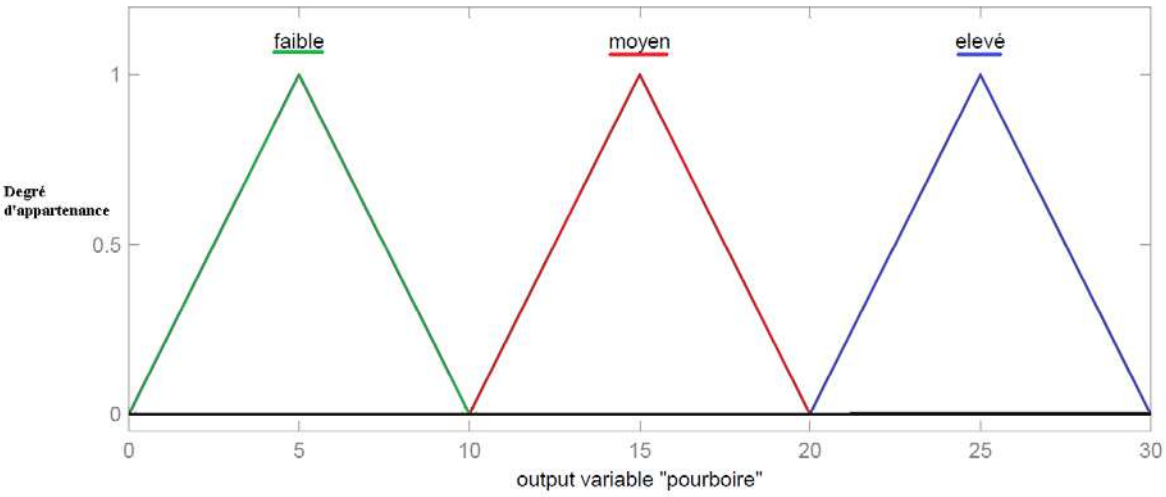


Figure 1.5: Variable linguistique 'qualité du service'



$$V = qualité\ de\ la\ nourriture$$
$$X = \Re^{+}$$
$$T_V = \{exécrable, délicieux\}$$

Figure 1.6: Variable linguistique 'qualité de la nourriture'



$$V = montant\ du\ pourboire$$
$$X = \Re^{+}$$
$$T_V = \{faible, moyen, élevé\}$$

Figure 1.7: Variable linguistique 'montant du pourboire'

I.4 Les operateurs flous :

An de pouvoir manipuler aisément les ensembles flous, nous redéfinissons les operateurs

De la théorie des ensembles classiques an de les adapter aux fonctions d'appartenance

Propres a la logique floue permettant des valeurs strictement entre 0 et 1.

Contrairement aux définitions des propriétés des ensembles flous qui sont toujours les

Mêmes, la définition des operateurs sur les ensembles flous est choisie, a l'instar des Fonctions d'appartenance. Voici les deux ensembles d'operateurs pour le complément (NON), l'intersection (ET) et l'union (OU) utilises le plus couramment :

Dénomination	Intersection ET : $\mu_{A\cap B}(x)$	Réunion OU : $\mu_{A\cup B}(x)$	Complément NON : $\mu_{A(x)}$
Operateurs de Zadeh MIN/MAX	$\min(\mu_A(x),\mu_B(x))$	$\max(\mu_A(x),\mu_B(x))$	$1-\mu_A(x)$
Probabiliste PROD/PROBOR	$\mu_A(x)*\mu_B(x)$	$\mu_A(x)+\mu_B(x)$- $\mu_A(x)*\mu_B(x)$	$1-\mu_A(x)$

Avec les définitions usuelles des operateurs flous, nous retrouvons toujours les propriétés de commutativité, distributivité et associativité des operateurs classiques. Cependant, Relevons deux exceptions notables :

En logique ou, le principe du tiers exclu est contredit :$A \cup \bar{A} \neq X$, autrement dit $\mu_{A\cup\bar{A}}(x) \neq 1$.

En logique floue, un élément peut appartenir a A et non A en même temps :

$A \cap \bar{A} \neq \emptyset$, autrement dit$\mu_{A\cup\bar{A}}(x) \neq 0$. Notons que ces éléments correspondent a l'ensemble supp(A) - noy(A).

I.5 Le raisonnement en logique floue :

En logique classique, les raisonnements sont de la forme :

Si p alors q

p vrai alors q vrai

En logique floue, le raisonnement ou, également appele raisonnement approximatif, Se base sur des règles floues qui sont exprimées en langage naturel en utilisant les Variables linguistiques dont nous avons donne la définition précédemment. Une règle floue aura cette forme :

Si$x \epsilon A$ et $y \epsilon B$ alors z ϵ C, avec A ,B et C des ensembles flous.

Par **exemple** :

'Si (la qualité de la nourriture est délicieuse), alors (le pourboire sera élève)'.

La variable 'pourboire' appartient a l'ensemble floue 'élève' a un degré qui dépend

Du degré de validité de la prémisse, autrement dit du degré d'appartenance de la

Variable 'qualité de la nourriture' a l'ensemble floue 'délicieux'. L'idée sous-jacente est

Que plus les propositions en prémisse sont variées, plus l'action préconisée pour les

Sorties doit être respectée. Pour connaitre le degré de vérité de la proposition floue

'Le pourboire sera élève', nous devons denier l'implication floue.

A l'instar des autres operateurs floues, il n'existe pas de denition unique de l'application

Floue : le concepteur du système ou devra choisir parmi le large choix d'implications

Floues déjà dénies, ou bien la denier a la main. Voici les deux denitions

De l'implication floue les plus couramment utilisées :

Nom	Valeur de vérité_
Mamdani	$\min\ (f_a(x), f_b(x))$
Larsen	$f_a(x) * f_b(x)$

Fait notable, ces deux implications ne généralisent pas l'implication classique. Il existe

D'autres définitions d'implication floue la généralisant, mais elles sont moins utilisées.

Si nous choisissons l'implication de Mamdani, voici ce que nous obtenons pour la

Règle floue 'Si (la qualité de la nourriture est délicieuse), alors (le pourboire sera

Élève)' lorsque la qualité de la nourriture est notée 8,31 sur 10 :

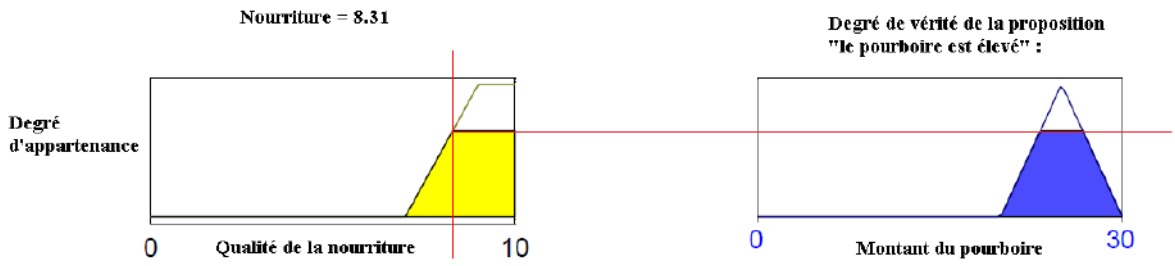


Figure 1.8: Exemple d'implication floue

Le résultat de l'application d'une règle floue dépend donc de trois facteurs :

1. la définition d'implication floue choisie ;

2. la définition de la fonction d'appartenance de l'ensemble flou de la proposition située en conclusion de la règle floue ;
3. le dégrée de validité des propositions situées en prémisse.

Comme nous avons défini les operateurs flous ET, OU et NON, la prémisse d'une règle Floue peut très bien être formée d'une conjonction de propositions floues. L'ensemble des règles d'un système ou est appelé la **matrice des décisions**. Voici celui de notre Exemple du pourboire :

Si le service est mauvais ou la nourriture est exécrable	alors le pourboire est faible
Si le service est bon	alors le pourboire est moyen
Si le service est excellent ou la nourriture est délicieuse	alors le pourboire est elevé

La figure 1.9 montre nous obtenons pour la règle floue 'Si (le service est excellent ou la nourriture est délicieuse), alors (le pourboire sera élevée)' lorsque la qualité Du service est notée 7,83 sur 10 et la qualité de la nourriture 7,32 sur 10 si nous Choisissons l'implication de Mamdani ainsi que la traduction du OU par MAX.

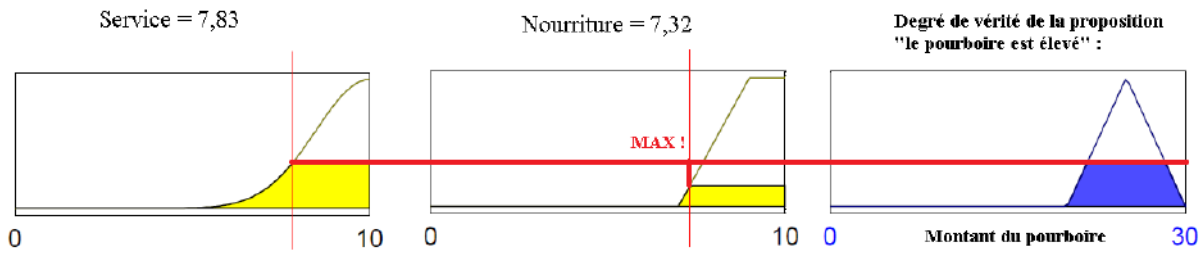


Figure 1.9: Exemple d'implication floue avec conjonction OU traduite par un MAX

Nous allons maintenant appliquer l'ensemble des 3 règles de notre matrice des décisions. Cependant, nous allons obtenir 3 ensembles flous pour le pourboire : nous les agrégerons par l'operateur MAX qui est presque toujours utilise pour l'agrégation. La figure 1.10 montre cette agrégation.

Comme nous le voyons, il ne nous reste plus qu'_a prendre la décision finale, _a savoir quel pourboire nous allons réellement donner sachant que la qualité du service est notée 7,83 sur 10 et la qualité de la nourriture 7,32 sur 10. Cette étape finale, qui permet de passer de l'ensemble ou issu de l'agrégation des conclusions _a une décision unique, s'appelle la défuzzification.

I.6 La défuzzification :

Comme pour tous les opérateurs flous, le concepteur du système ou doit choisir parmi plusieurs définitions possibles de défuzzification. Une liste détaillée peut ^être consultée dans [4] Nous allons présenter brièvement les
deux principales méthodes de défuzzification : la méthode moyenne des maxima (MM) et la méthode du centre de gravite (COG).

La défuzzification MM définit la sortie (décision du montant du pourboire) comme

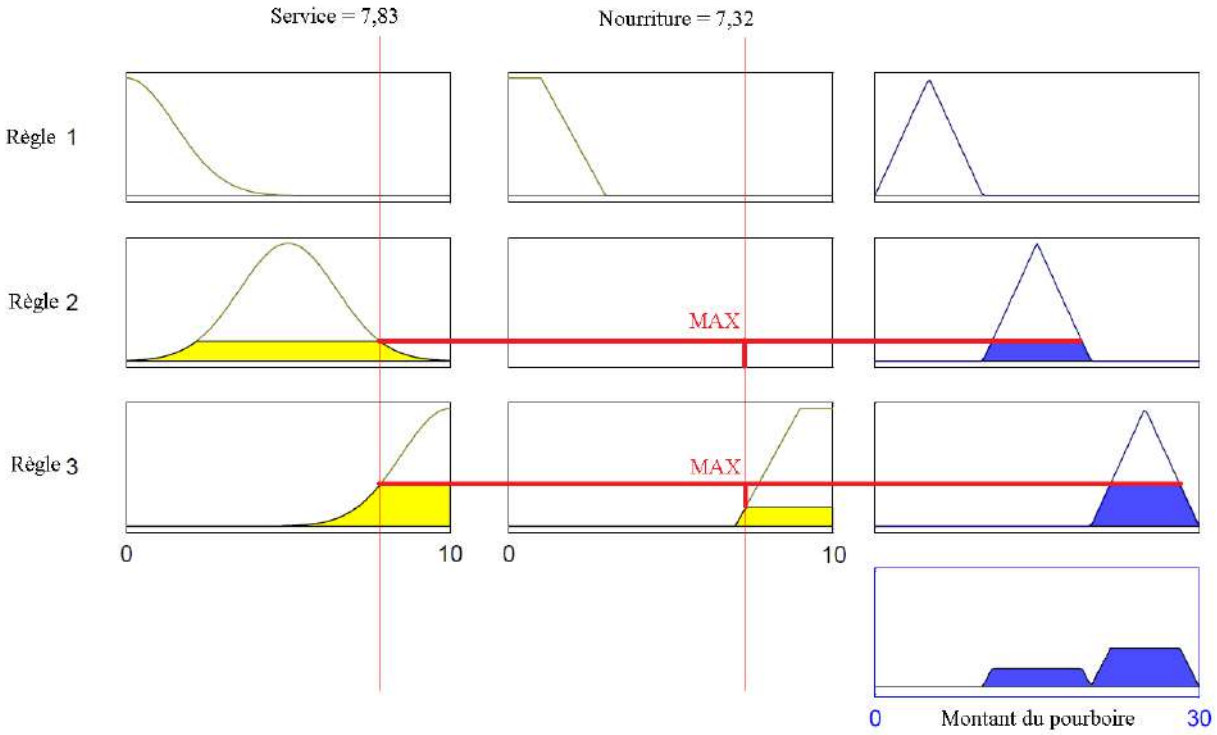


Figure 1.10: Exemple d'implication floue en utilisant la matrice des décisions

étant la moyenne des abscisses des maxima de l'ensemble ou issu de l'agrégation des conclusions.

$$\text{Décision} = \frac{\int_S y.dy}{\int_S dy}$$

Ou $S = \{y_m \in R, \mu(y_m) = SUP_{y \in R}(\mu(y_m))\}$

et R est l'ensemble ou issu de l'agrégation des conclusions.

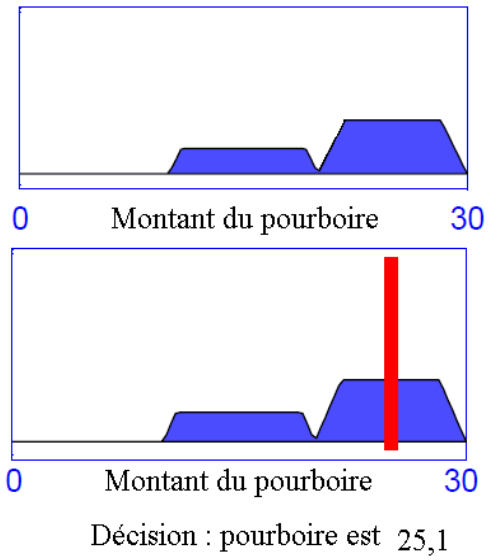


Figure 1.11: Défuzzification avec la méthode moyenne des maxima (MM)

La défuzzifcation COG est plus couramment utilisée. Elle définit la sortie comme Correspondant _a l'abscisse du centre de gravite de la surface de la fonction d'appartenance Caractérisant l'ensemble ou issu de l'agrégation des conclusions.

$$\text{Décision} = \frac{\int_s y.\mu(u).dy}{\int_s \mu(u).dy}$$

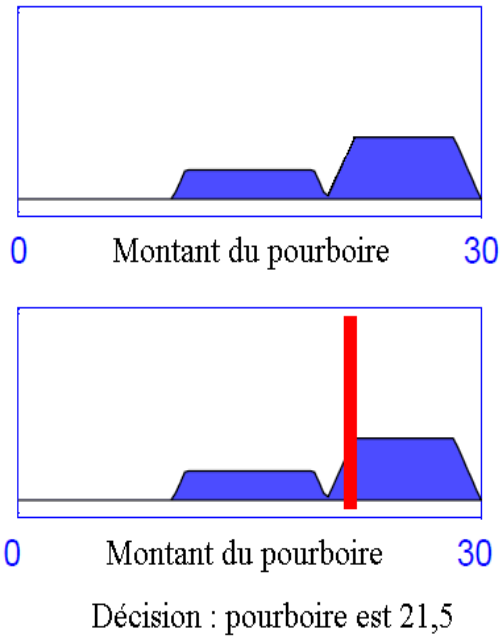


Figure 1.12: Défuzzification avec la méthode centre de gravite (COG)

Cette définition permet d'éviter les discontinuités qui pouvaient apparaitre dans la

Défuzzification MM, mais est plus complexe et demande des calculs plus importants. Certains travaux tel[5] cherchent a améliorer les performances en cherchant d'autres méthodes aussi efficaces mais avec une complexité algorithmique Moindre. Comme nous le voyons sur les 2 figures montrant les méthodes de Défuzzification MM et COG appliquées à notre exemple, le choix de cette méthode a Un effet important sur la décision finale.

I.7 Conclusions :

Au cours des définitions, nous avons vu que le concepteur d'un système ou doit faire Un nombre de choix important. Ces choix se basent essentiellement sur les conseils De l'expert ou sur l'analyse statistique des données passées, en particulier pour définir Les fonctions d'appartenance et la matrice des décisions.

Voici un aperçu synoptique d'un system ou :
Dans notre exemple,

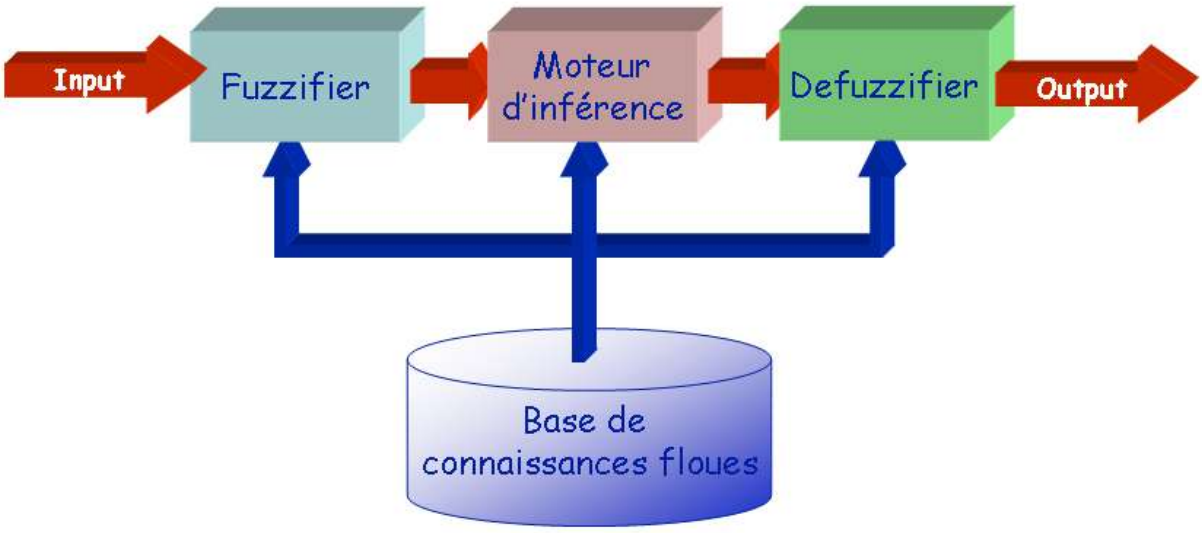


Figure 1.13: Aperçu synoptique d'un système flou

- **l'input** est 'la qualité du service est notée 7,83 sur 10 et la qualité de la nourriture 7,32 sur 10' ;

-le **fuzzifier** correspond aux 3 variables linguistiques 'qualité du service', 'qualité de la nourriture' et 'montant du pourboire' ;

- le **moteur d'inférence** est constitue du choix des operateurs flous ;
- la **base de connaissances floues** est l'ensemble des règles floues ;
- le **defuzzier** est la partie où entre en jeu la méthode de défuzzification ;
- l'**output** correspond a la décision finale : 'le montant du pourboire est 25,1'.

Il est intéressant de voir l'ensemble des décisions en fonction de chacune des variables Avec notre système d'inférence ou (figure 1.14) par rapport au type d'ensemble de Décisions que nous obtiendrions en utilisant la logique classique (figure 1.15).

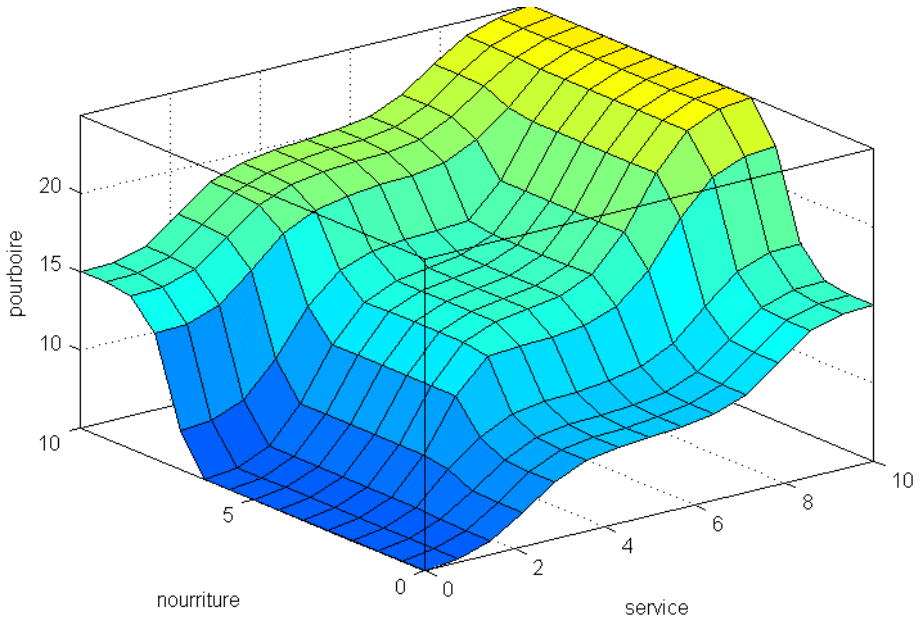


Figure 1.14: Ensemble des décisions d'un système flou

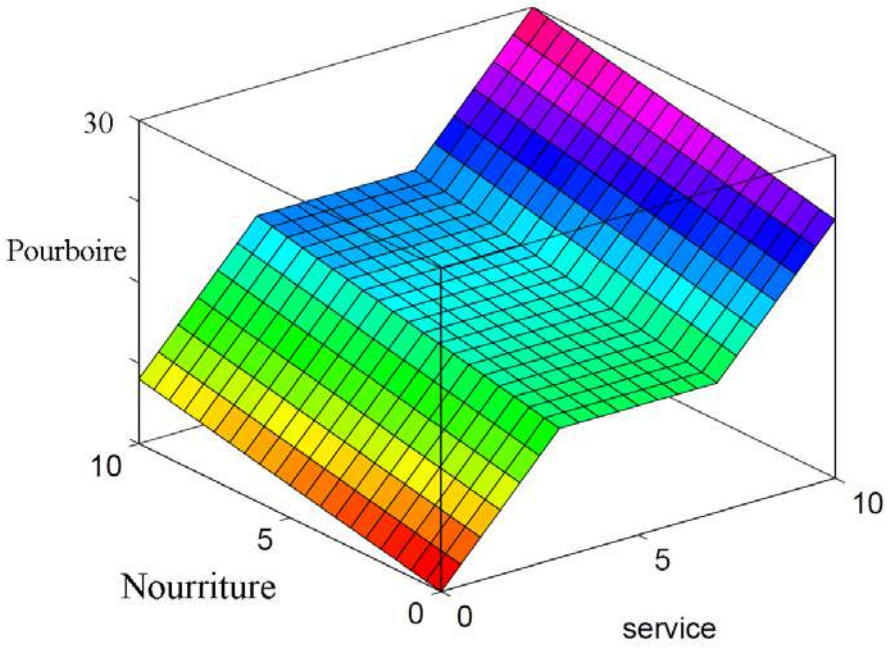


Figure 1.15: Ensemble des décisions d'un système se basant sur la logique clas- Sique

Ainsi, toute la puissance de la logique floue est de rendre possible la mise en place De systèmes d'inférence dont les décisions sont sans discontinuités, flexibles et non linéaires, plus proche du comportement humain que ne l'est la logique classique. De Plus, les règles de la matrice des décisions sont exprimées en langage naturel, ce qui comporte de nombreux avantages, comme par exemple inclure des connaissances D'un expert non informaticien au cœur d'un système décisionnel ou encore modéliser Plus finement certains aspects du langage naturel.

II. Modélisation floue de systèmes

II.1 Introduction

Les modèles flous peuvent être considérés comme des modèles logiques qui utilisent des règles du type « Si…Alors… » pour établir des relations qualitatives entre les variables du modèle. Ils reposent sur une dualité linguistique/numérique dans laquelle les ensembles flous servent d'interfaces entre les variables qualitatives (linguistiques) impliquées dans les règles et les valeurs numériques présentes dans les données entrées/sorties du modèle. La nature des modèles flous, basée sur des règles, permet l'utilisation d'information sous la forme des expressions du langage naturel, ce qui facilite la formalisation de la connaissance des experts ainsi que la transparence et l'interprétabilité du modèle. De plus, les modèles flous ont une structure mathématique flexible capable d'approximer un grand nombre de systèmes non linéaires complexes avec une bonne précision [6] [7] [8] Les algorithmes d'apprentissage sont aussi utilisés pour la modélisation floue, ils peuvent même être combinés avec des techniques conventionnelles de régression [9] [10] [11].

Dans cette section nous introduisons d'abord d'une manière très succincte la structure générale ainsi que différentes types de modèles flous. Ensuite nous nous focalisons en particulier sur une description du modèle flou de type Takagi-Sugeno. Enfin nous abordons le but et les différentes approches pour l'identification de modèles flous en mettant l'accent sur l'approche de construction de modèles à partir de données.

II.2. Structure générale et différents types de modèles flous

En général les systèmes flous s'appuient sur une représentation de la connaissance sous forme de règles « Si-Alors » qui permettent de représenter les relations entre les variables d'entrée et de sortie dont l'expression générique est de la forme :

Si antécédent **Alors** conséquent

Dans un premier temps et afin de faciliter l'interprétation, on peut considérer l'*antécédent* (*prémisse*) comme une description linguistique qui indique les *conditions* de validité du phénomène représenté. Pour sa part, le *conséquent* (*conclusion*) représente le *comportement* associé aux conditions de validité décrites par l'antécédent.

Considérons à titre illustratif la règle suivante :

Si concentration de polluant est élevée **Alors** temps de dégradation est long

Les règles floues établissent des relations logiques entre les variables du système en associant valeurs *qualitatives* d'une variable (la concentration de polluant est *élevée*) avec celles d'une autre variable (le temps de dégradation est *long*). Les valeurs qualitatives ont typiquement une interprétation linguistique, elles sont nommées *termes linguistiques* (étiquettes). La signification des termes linguistiques par rapport aux variables d'entrée/sortie numériques (concentration de polluant, temps de dégradation) est définie par des ensembles flous appropriés. Dans ce sens, les ensembles flous, ou plus précisément leurs fonctions d'appartenance, fournissent une interface entre les variables numériques d'entrée/sortie et les valeurs linguistiques qualitatives dans les règles.
Selon la structure particulière de la proposition conséquent, on peut distinguer trois types de modèles flous basés sur des règles[11] :

• *Modèle flou linguistique* (ou modèle Mamdani), dans lequel l'antécédent et le conséquent sont tout les deux des propositions floues qui utilisent des variables linguistiques[12] 13].
• *Modèle flou relationnel*, qui peut être considéré comme une généralisation du modèle linguistique dans lequel il est possible d'associer une proposition antécédent spécifique avec plusieurs propositions conséquents différentes via une relation floue. Cette relation floue représente des associations entre les ensembles flous individuels définis dans les domaines d'entrée/sortie du modèle[14] [15] .
• *Modèle flou Takagi-Sugeno* (TS), dans lequel le conséquent utilise des variables numériques plutôt que des variables linguistiques, sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou de manière plus générale d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à la proposition antécédent[9].

Dans le cadre des applications de la logique floue en commande des systèmes, les types de modèles les plus souvent utilisés sont ceux de Mamdani et de Takagi-Sugeno (noté TS). Les exemples suivants correspondent à ces deux types de règles :
Si polluant est élevée et biomasse est faible **Alors** temps de dégradation est long

Si polluant est élevée et biomasse est faible **Alors** $t = 30P + 50B + 10$

La première règle est celle d'un modèle de type Mamdani utilisant les variables linguistiques associées aux concentrations de polluant, biomasse et le temps de dégradation tandis que la seconde est celle d'un modèle de type Takagi-Sugeno où la variable *t* du conséquent (temps de dégradation) est numérique sous la forme d'une fonction des variables associées à l'antécédent. Ici *P* et *B* représentent respectivement les valeurs numériques des concentrations de polluant et de biomasse.

Dans un cadre plus formel, la représentation d'un modèle flou demande souvent l'utilisation de plusieurs règles et comporte diverses opérations mathématiques pour le traitement d'informations symboliques, hors de la portée de ce document. Dans la suite nous abordons d'une manière succincte les notions de base de la logique floue appliquée à la modélisation et à la commande. Nous supposons que le lecteur a une connaissance préalable dans ce domaine. Nous recommandons aux personnes intéressées de se référer, entre autres, aux ouvrages [16] [17][18] [11] pour un traitement plus approfondi.

Afin d'établir quelques éléments de base de la logique floue nécessaires dans le cadre de nos travaux, reprenons une règle linguistique *Ri* de la forme générale suivante :

Ri : **Si x** est *Ai* **Alors y** est *Bi*, $i = 1, \ldots, r$ (2.1)

où *r* dénote le nombre de règles du modèle. $x \in X \subset \mathfrak{R}^q$ est la variable de l'*antécédent*, qui représente l'entrée du système et $y \in Y \subset \mathfrak{R}^q$ est la variable du *conséquent*, qui représente la sortie du système flou. Habituellement la dimension de l'espace du conséquent est prise comme $q = 1$. *X* et *Y* correspondent respectivement aux domaines (*univers de discours*) des variables d'entrée et de sortie. *Ai* et *Bi* sont des *termes linguistiques* qui correspondent aux valeurs qualitatives associées aux variables de base **x** et **y** . Ces termes linguistiques sont décrits par des ensembles flous définis par des *fonctions d'appartenance* μ , qui établissent une correspondance de chacun des univers de discours vers l'intervalle [0,1], ainsi :

$$\mu_{Ai}(x): X \to [0.1], \mu_{Ai}(y): Y \to [0.1] \quad (2.2)$$

La théorie des ensembles flous[19] permet une appartenance partielle d'un élément à un ensemble. Prenons à titre d'exemple $\mu_{Ai}(x)$, qui symbolise la valeur de la fonction d'appartenance (nommé le *degré d'appartenance*) de **x** à l'ensemble caractérisé par *Ai*. Si le degré d'appartenance est égal à un, alors l'élément **x** appartient complètement à l'ensemble. Si celui-ci est égal à zéro, alors l'élément **x** n'appartient pas à cet ensemble. Si le degré d'appartenance se trouve entre zéro et un, alors **x** appartient partiellement à l'ensemble flou. Le degré d'appartenance permet alors une gradation du degré de constatation des faits.
Les ensembles flous *Ai* définissent des régions floue dans l'espace de l'antécédent pour lequel la prémisse du conséquent est valable. Le niveau de précision avec lequel peut être représenté un système donné par un modèle flou est associé avec la *granularité* du traitement de l'information, qui dépend entre autres, du nombre de termes linguistiques ainsi que de la forme particulière et du degré de chevauchement (*overlaping*) des fonctions d'appartenance utilisées dans le modèle.
Typiquement plusieurs formes de fonctions d'appartenance sont utilisées dans les

applications. La Figure 2.1 montre un aperçu des fonctions d'appartenance les plus usuelles :

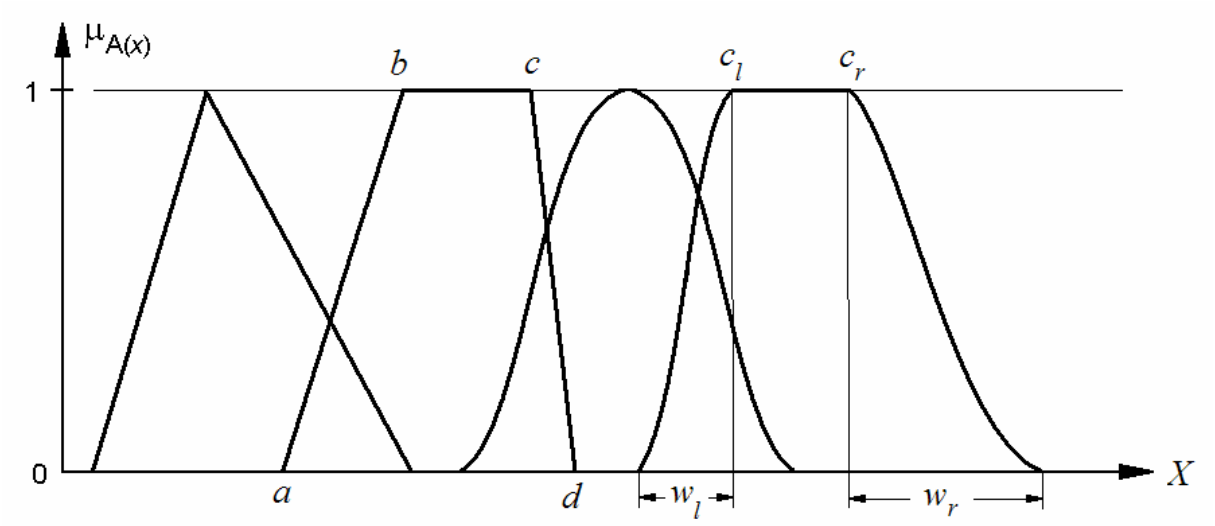


Figure 2.1. Formes typiques représentatives des fonctions d'appartenance

Les fonctions d'appartenance peuvent être définies par le développeur du modèle (l'expert) en utilisant la connaissance préalable ou bien l'expérimentation. Cette dernière approche est typique de la commande floue basée sur la connaissance[20]. Dans ce cas,

les fonctions d'appartenance sont conçues de telle manière qu'elles représentent la signification des termes linguistiques dans le contexte donné. Quand des données entrée-sortie du procédé sont disponibles, il est alors possible d'appliquer des méthodes pour l'obtention ou l'adaptation des fonctions d'appartenance. Nous donnons un aperçu de cette approche dans la section 2.2.

Dans les univers de discours continus, les ensembles flous sont définis analytiquement par des fonctions d'appartenance. Afin de faciliter les calculs, elles sont souvent paramétrées [11]. Voyons deux cas assez généraux :

Fonction d'appartenance trapézoïdale

$$\mu(x,a,b,c,d) = \max\left\{0, \min\left\{\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right\}\right\} \quad (2.3)$$

où *a*,*b*,*c*,*d* sont les coordonnées des sommets du trapèze (voir Figure 2.1). Il faut remarquer que quand *b* = *c* on obtient une fonction d'appartenance triangulaire.

Fonction d'appartenance exponentielle par morceaux :

$$M(x, c_l, c_r, w_l, w_r) = \begin{cases} exp\left\{-\left(\frac{x-c_l}{2w_l}\right)^2\right\} & si \quad x < c_l \\ exp\left\{-\left(\frac{x-c_r}{2w_r}\right)^2\right\} & si \quad x > c_r \\ 1 \quad \textbf{les autres cas} \end{cases} \tag{2.4}$$

où les paramètres $\{w_l, w_r, c_l etc_r\}$ correspondent aux points définis sur la Figure 2.1.

Pour les conditions $c_l = c_r$ et $w_l = w_r$ on obtient la fonction d'appartenance Gaussienne.

En revenant sur la règle linguistique générale décrite par l'expression (3.1), les systèmes flous basés sur des règles du type « Si…Alors » ont des antécédents et des conséquents qui sont spécifiés de manière symbolique. Dans le cadre de la modélisation et la commande de systèmes, l'exploitation d'une telle connaissance nécessite en général la mise en place d'interfaces numérique/symbolique (N/S) et symbolique/numérique (S/N). Ces dernières sont en effet des passerelles indispensables à l'établissement d'un lien entre l'ensemble de règles (*base de règles*) qui interfacent le système flou et le procédé, sur lequel seules des mesures et des actions numériques sont envisageables. De manière classique, le fonctionnement interne des systèmes flous repose sur une structure, représentée sur la Figure 2.2[11] [21],qui inclut :

- la *fuzzification* des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement45 de l'information ;
- l'*inférence* à partir d'une *base de connaissance*,
- la *défuzzification*, avec éventuellement un post-traitement d'information.

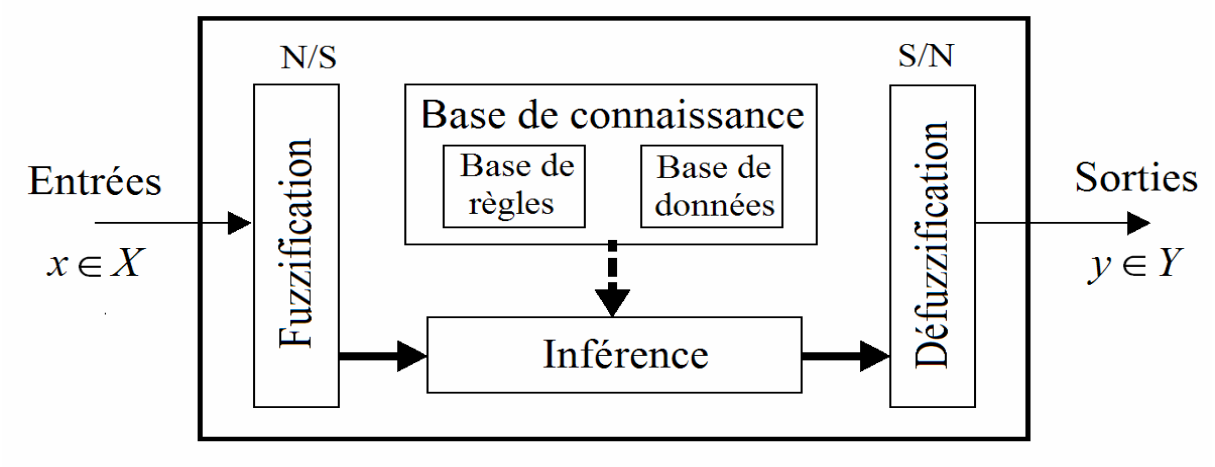


Figure 2.2. Représentation interne d'un système flou

L'étape de *fuzzification* consiste à transformer les entrées numériques disponibles en parties floues. Celles-ci alimentent alors le mécanisme d'*inférence* qui à partir d'une valeur d'entrée et selon la connaissance fournie par la *basse de connaissance*, détermine la valeur correspondante de la sortie. Cette base de connaissance est composée par la *base de règles* et par la *base de données*, qui stocke les fonctions d'appartenance associées aux termes linguistiques employés dans le système flou. Cela constitue le fondement du « *raisonnement approché* » du système, car la combinaison des entrées avec les règles floues permet de tirer des conclusions. Enfin, la *défuzzification* est l'opération inverse de la fuzzification, en convertissant les parties floues relatives aux sorties du mécanisme d'inférence en sorties numériques.

Remarque :

R 2.1 Bien que nous ayons associé - à titre illustratif - une interprétation de conversion numérique/symbolique pour l'étape de fuzzification et inversement pour celle de défuzzification, il doit être souligné que des études approfondie[22] ont montré qu'il s'agit d'un cas particulier. En effet, en considérant la nature numérique ou symbolique des données entrant et sortant du bloc d'inférence, il est possible de mettre en évidence différentes implantations possibles sous la forme d'une typologie des systèmes flous. Ainsi, l'implantation montré sur la Figure 3.2 est dite linguistique, ce sont les blocs de fuzzification et de défuzzification qui réalisent les interfaces N/S et S/N. Elle permet de mener à bien l'inférence directement au niveau symbolique et autorise ainsi l'exploitation de règles linguistiques pondérées [21].

II.2.1 Prémisses de l'antécédent et composition de la base de règles :

La proposition de l'antécédent peut contenir des ensembles flous définis directement dans le domaine du vecteur $\mathbf{x} \in X \subset \Re p$, comme dans le cas de la règle (2.1), ce qui correspond aux ensembles flous *multidimensionnels*. Néanmoins, plus habituellement les règles sont représentées sous sa forme *décomposée*, dans laquelle l'antécédent est défini comme une combinaison de propositions floues simples, définies sur les composants individuels $x_i$de **x** .

Les opérateurs logiques de conjonction (intersection), disjonction (union) et négation (complément) peuvent être utilisés afin de construire une proposition floue composée, par exemple :

Ri : Si x_1 **et** A_{i1} **et** x_2 **est** A_{i2}**ou** x_3 **N'est pas** A_{i3} **Alors** y **est** B_i (2.5)

dans laquelle des ensembles flous *unidimensionnels* sont définis pour chaque composant du vecteur *antécédent*. Le degré d'accomplissement β_i (*degree of fulfillment*) de la règle est alors calculé en employant les opérateurs d'intersection, d'union et de complément appropriés, par exemple :

$$\beta_i = \mu_{Ai1}(x_1) \wedge \mu_{Ai2}(x_2) \vee (1 - \mu_{Ai3}(x_3)) \quad (2.6)$$

où l'opérateur *min*imum (∧) représente dans ce cas la conjonction (**et**), l'operateur *max*imum (∨) représente la disjonction (**ou**), et 1−μ est le complément (négation : **n'est pas**). Néanmoins, la généralisation des opérations d'union et d'intersection ensembliste classique aux sous-ensembles flous n'est pas définie de manière unique. Il existe, en fait, une multitude d'opérateurs de disjonction et de conjonction utilisés dans les propositions floues. Ces operateurs sont regroupés en deux familles : les normes triangulaires, notées *t-normes*, qui définissent les opérateurs d'intersection ou de conjonction et les conormes triangulaires, notées *t-conormes*, qui définissent les opérateurs d'union ou de disjonction. De manière générale ces operateurs sont des fonctions définies dans l'espace [0, 1] x [0, 1] → [0, 1], mais elles ont des propriétés distinctes qui vont influencer le type de raisonnement approché qui va en découler [17]. En prenant comme les opérandes $x, y \in [0, 1]$, le Tableau 2.1 regroupe quelques définitions de *t*-normes ($t(x, y)$) et *t-conormes*[46] ($s(x, y)$) duales utilisées fréquemment[11] [23]. Pour plus de détails sur les différents opérateurs le lecteur peut consulter, par exemple,[24][25] [26].

t-norme : $t(x, y)$ (intersection floue)	t-conorme : $s(x, y)$ (union floue)	Nom
$min(x, y)$	$max(x, y)$	min et max de Zadeh
$x \cdot y$	$x + y - x \cdot y$	Produit et somme algébrique (Bandler)
$max(0, x + y - 1)$	$min(1, x + y)$	Produit et somme bornés (Lukasiewicz

Tableau 2.1. Principales t-normes et t-conormes

Les systèmes d'inférence floue (SIF) sont composés par une collection de plusieurs règles. Dans le cas des SIF avec une structure Mamdani conventionnelle (modèle linguistique), la forme la plus commune de ces règles est la forme dite ***conjonctive***[47] donnée par :

$\mathbf{R_i}$: **Si** $\mathbf{x_1}$ est $\mathbf{A_{i1}}$ **et** $\mathbf{x_2}$ est $\mathbf{A_{i2}}$ **et** … **et** $\mathbf{x_p}$ est $\mathbf{A_{ip}}$ **Alors** *y* est $\mathbf{B_i}$ (2.7)

Pour l'*i*-ème règle $\mathbf{R_i}$ du système, les *p* variables ($\mathbf{x_1}$ à $\mathbf{x_p}$) de l'antécédent sont associées aux ensembles flous ($\mathbf{A_{i1}}$ à $\mathbf{A_{ip}}$) et le conséquent *y* est associé à un autre ensemble flou $\mathbf{B_i}$.

Les termes linguistiques représentés par $\mathbf{A_i}$et $\mathbf{B_i}$sont définis par des ensembles flous caractérisés par des fonctions d'appartenance μ_{Ai}(x) :$\Re^p$ →[0, 1] et μ_{Bi} (*y*) :$\Re$→[0, 1].

Dans ce cas on peut voir le système flou comme une représentation qualitative qui décrit le comportement du système en utilisant une description linguistique.

II.2.2 Inférence et défuzzification dans le modèle linguistique :

L'*inférence* dans les systèmes flous basés sur des règles, est le processus consistant à obtenir un ensemble flou de sortie étant donné une collection de règles et les entrées du système. Le mécanisme d'inférence dans le modèle linguistique est basé sur la *règle compositionnelle d'inférence*[12]. L'idée de base consiste à dériver un ensemble floue de sortie qui représente une conclusion globale issue de l'évaluation de l'ensemble des règles (*agrégation*) et du constat d'un certain fait d'entrée. Par simplicité, considérons ici une seule règle avec antécédent et conséquent scalaires de la forme "**Si** *x* est *A* **Alors** *y* est *B* " ainsi que le fait (*x* est *A*'), qui signifie que le sous-ensemble flou d'entrée *A*' est en un certain degré différent du sous-ensemble *A* de la prémisse. Le raisonnement mené dans le mécanisme d'inférence est basé sur le *modus ponens* généralisé, illustré de la manière suivante :

Règle : **Si** *x* est *A* **Alors** *y* est *B*
Fait : *x* est *A*'
Conclusion : *y* est *B*'

Le raisonnement approché est représenté dans ce cas par la proposition floue (*y* est *B*'), qui met en évidence que la conclusion *B*' dérivé est "moins certaine" que *B* , le sous ensemble flou du conséquent.

Pour le cas des entrées numériques précises (*crisp*) et en utilisant la *t-norme,* le schéma de raisonnement peu être simplifié, aboutissant à celui bien connu dans la littérature appelé le max-min ou inférence de Mamdani [24]. Pour le cas de la règle composée définie par l'expression (3.7), l'inférence de Mamdani peut être résumée comme suit[11] :

Pas 1 : Pour chaque règle R_i du système (i = 1,…, r), calculer le degré d'accomplissement $\beta_i$de l'antécédent :

$$\beta_i = \mu_{Ai1}(x_1) \wedge \mu_{Ai2}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{Ai3}(x_p) \qquad (2.8)$$

Pas 2 : L'ensemble flou de sortie B_i' est dérivé pour chaque règle, en utilisant la *t*-norme du minimum :

$$\mu_{B'_i}(y) = \beta_i \wedge \mu_{B'_i}(y) \qquad \forall y \in Y \qquad (2.9)$$

Pas 3 : L'ensemble flou de sortie agrégé *B*' est calculé en prenant le maximum (union) des conclusions individuelles B_i '

$$\mu_{B'}(y) = max\ \mu_{B'}(y), \qquad \forall y \in Y \qquad i=1,\dots,r \qquad (2.10)$$

L'expression (3.32) peut être généralisée en introduisant des opérateurs quelconques de type *t*-norme/*t*-conorme (voir par exemple[27] [28]). Le sous-ensemble floue de sortie *B*' peut alors être obtenu par l'expression :

$$\mu_{B'}(y) = \underset{i=1,2,\dots,r}{\perp} T(\mu_{A'}(x), I(\mu_A(x), \mu_B(y))) \qquad \forall y \in Y \qquad (2.11)$$

où ⊥ représente une *t*-conorme, *T* est une *t*-norme et *I* représente l'implication floue.

Cette définition générale tient compte de l'aspect graduel des sous-ensembles flous : ainsi la conclusion (*y* est *B*') est d'autant plus proche de la conclusion de la règle (*y* est *B*) que la donnée (*x* est *A*') est proche du prémisse de la règle (*x* est *A*).

Dans les SIF le traitement des informations fait intervenir les opérateurs logiques **et** et **ou** pour lier les variables floues d'entrée au niveau des conditions de chaque règle. Le terme **Alors,** introduisant la conclusion de chaque règle, est réalisée à partir de l'expression (2.11). L'implication floue (*I*) et la *t*-norme de cette expression permettent de former des fonctions d'appartenance partielles (par règle) qui sont ensuite combinés au cours de la phase d'*agrégation* de règles, pour fournir en sortie, la fonction d'appartenance globale résultante $\mu_{B'}(y)$qui caractérise le sous-ensemble flou *B*' . Nous l'avons déjà souligné, il existe plusieurs méthodes de réalisation des opérateurs **et** ou **ou**, dont les noms sont associés au choix des méthodes d'agrégation des règles et d'implication. On utilise généralement l'une

des trois méthodes d'inférence suivantes : *max-min* (Mamdani), *max-prod* et *somme-prod*, où le terme *somme* correspond au calcul de la valeur moyenne et *prod* au produit.

Comme on vient de le voir, le résultat de l'inférence floue est le sous-ensemble flou B' . Cet ensemble flou est caractérisé par la fonction d'appartenance globale résultante pour la variable de sortie $y \in Y \subset \Re$ définie sur un univers de discours, disons, $[a, b]$. Comme nous l'avons remarqué dans la Figure 3.2 pour le bloc de fuzzification, ici aussi il faudra envisager l'opération inverse permettant de transformer les grandeurs floues en grandeurs numériques pour les transmettre à l'extérieur du système. La *défuzzification* consiste alors en une transformation qui remplace le sous-ensemble flou de sortie de l'inférence par une valeur numérique unique représentative de cet ensemble. Il existe plusieurs techniques de défuzzification mais la plus utilisée est la méthode par centre de gravité. Il s'agit de déterminer la coordonnée en y du centre de gravité (noté COG[48]) du sous-ensemble flou B' résultant de l'inférence :

$$cog(B') = \frac{\int_a^b y\, \mu_{B'}(k) dy}{\int_a^b \mu_{B'}(k) dy} \qquad (2.12)$$

Le numérateur correspond au moment et, le dénominateur, à la surface. La défuzzification peut aussi être réalisée par d'autres méthodes, par exemple en prenant la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante ou bien la moyenne des abscisses du maximum (en anglais MOM[49]). A partir d'une interprétation géométrique de cette dernière, la méthode MOM peut être utilisée par exemple dans des applications de prise de décisions pour privilégier la sortie la "plus plausible". La méthode du centre de gravité (COG) est utilisée avec l'inférence max-min de Mamdani, dans la mesure qu'elle fournit une interpolation proportionnelle à la taille des sous-ensembles flous individuels des conséquents. Cela est nécessaire, car la méthode d'inférence de Mamdani n'a pas d'effet interpolateur, et l'utilisation de la méthode MOM dans ce cas-ci, fournit une sortie abrupte avec des changements par morceaux [11].

II.3. Le modèle flou de type Takagi-Sugeno :

Un autre type de modèle flou, approprié pour l'approximation d'une classe générale de systèmes non linéaires est celui proposé par Takagi et Sugeno [9]. Ce type de modèle est, comme celui de Mamdani, construit à partir d'une base de règles "Si…Alors…", dans laquelle si la prémisse est toujours exprimée linguistiquement, le conséquent utilise des variables

numériques plutôt que des variables linguistiques. Le conséquent peut s'exprimer par exemple, sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou de manière plus générale d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à l'antécédent. D'une manière générale, un modèle de type Takagi-Sugeno (TS) est basé sur une collection des règles R_i du type :

Ri : **Si x** est A_i **Alors** $y_i = f_i(x), \quad r = i, \dots, r$ (2.13)

où *i R* dénote la *i*-ème règle du modèle est *r* est le nombre de règles que contient la base de règles. $\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^p$ est la variable d'entrée (*antécédent*) et $y \in \mathfrak{R}$ est la variable de sortie (*conséquent*). *i A* est le sous-ensemble flou de l'antécédent de l'*i*-ème règle, définie, dans ce cas, par une fonction d'appartenance (*multivariable*) de la forme :

$$\mu_{Ai}(x) = \mathfrak{R}^p \rightarrow [0.1] \quad (2.14)$$

Comme dans le modèle linguistique, la proposition de l'antécédent " **x** est A_i " est normalement exprimée comme une combinaison logique de propositions simples avec des sous-ensembles flous *unidimensionnels* définis pour les composants individuels du vecteur **x** , usuellement dans la forme *conjonctive* suivante :

R_i : ***Si*** x_1 *est* A_{i1} ***et*** x_2 *est* A_{i2} ***et …et*** x_p *est* A_{ip} ***alors*** $y_i = f_i(x), \quad i=1,\dots,r$ (2.15)

Typiquement les fonctions *fi* sont choisies comme des fonctions paramétrées appropriées, avec la même structure pour chaque règle où seuls les paramètres varient. Une forme de paramétrisation souvent utilisée est la forme affine, donnée par :

$$y_i = a_i^T x + d_i \quad (2.16)$$

où $a_i \in \mathfrak{R}^p$ est un vecteur de paramètres et d_i est un scalaire. Ce modèle est appelé le *modèle affine Takagi-Sugeno*. Les conclusions des règles dans ce modèle sont alors des hyperplans (sous-espaces linéaires *p*-dimensionnels) dans l'espace $\mathfrak{R}^{p+1}$. Ainsi, en modélisation floue des systèmes, l'antécédent de chaque règle définit une région (floue) de validité pour le sous-modèle correspondant du conséquent. Le modèle global est composé par la concaténation des modèles locaux (linéaires) et peut être vue comme une approximation par morceaux d'une surface non linéaire correspondant à la sortie du système.

Un cas particulier de la fonction du conséquent s'obtient quand $d_1 = 0$, i= 1,…,K .Dans ce cas, le modèle est appelé modèle *homogène* Takagi-Sugeno [11], de la forme :

$$R_i : \textbf{Si } x \text{ est } A_i \textbf{ alors } y_i = a_i^T x , \qquad i = 1,\dots ;r \tag{2.17}$$

Ce modèle a des propriétés d'approximation plus limitées que le modèle affine TS [29] [30]. Cependant, dans le cadre de la commande des systèmes, l'absence du terme scalaire d_i^{50}(*biais*) facilite la synthèse du contrôleur ainsi que l'analyse de la stabilité basé sur des systèmes homogènes TS parce que le modèle peut être traité comme un modèle quasi-linéaire [31] [32][33].

Dans le cas où $a_i = 0$ pour i=1,…… ,r, les conséquents dans le modèle (2.16) prennent la forme d'une constante. Dans ce cas, le modèle, appelé *singleton*, est obtenu par :

R_i : **Si x** est A_i **Alors** $y_i = d_i$; i=1,…..,r (2.18)

Ce modèle peut aussi être vu comme un cas particulier du modèle flou linguistique, dans lequel les sous-ensembles flous des conséquents se réduisent aux singletons.

2.3.1 Inférence dans le modèle Takagi-Sugeno :

Avant de pouvoir inférer la sortie, il faut calculer d'abord le degré d'accomplissement β_i (**x**) de l'antécédent. Pour les règles avec des sous-ensembles flous multivariables dans l'antécédent (cf. expressions (2.13) et (2.14)), le degré d'accomplissement est simplement égal au degré d'appartenance de l'entrée multidimensionnelle **x** ; c'est-à-dire $\beta_i = \mu_{Ai}(x)$.

Quand des connectives logiques sont utilisées, le degré d'accomplissement de l'antécédent est calculé comme une combinaison des degrés d'appartenance des propositions individuelles en utilisant les opérateurs de la logique floue.

Dans la modélisation Takagi-Sugeno, l'obtention de la sortie du modèle est réalisée à partir d'une combinaison des opérations d'inférence et de défuzzification [21]. La sortie finale se calcule comme la moyenne des sorties correspondants aux règles R_i , pondérées par le degré d'accomplissement normalisé, selon l'expression [9] :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{r} \beta_i(x)\, y_i}{\sum_{i=1}^{r} \beta_i(x)} \tag{2.19}$$

En notant le degré normalisé d'accomplissement conformément à l'expression :

$$\lambda_i = \frac{\beta_i(x)}{\sum_{i=1}^{r} \beta_i(x)} \quad (2.20)$$

le modèle λ_i affine Takagi-Sugeno, avec une structure commune du conséquent, peut être exprimé comme un modèle pseudo-linéaire avec des paramètres dépendants des entrées :

$$y=(\sum_{i=1}^{r} \lambda_i(x)\, A_i^T)x + \sum_{i=1}^{r} \lambda_i(x) d_i = a^t(x)x + d(x) \quad (2.21)$$

Les paramètres **a**(**x**) et *d* (**x**) sont des combinaisons linéaires convexes des paramètres des conséquents a_i et d_i , de la forme :

$$a(x)=\sum_{i=1}^{r} \lambda_i(x)\, a_i \; ; \quad d(x)=\sum_{i=1}^{r} \lambda_i(x)\, d_i \quad (2.22)$$

De cette façon, le modèle TS peut être vu comme une correspondance (*mapping*) entre l'espace de l'antécédent (entrée) et une région convexe (polytope) dans l'espace des paramètres d'un système quasi-linéaire. Cette propriété a certains avantages qui facilitent l'analyse des systèmes flous TS dans le cadre des systèmes polytopiques [34].

Cependant, cette représentation a aussi des propriétés indésirables d'interpolation qui affectent la capacité d'approximation des systèmes. En effet, une amélioration du mécanisme d'inférence du modèle TS a été proposée [35]. L'idée centrale consiste, à partir de l'analyse des propriétés du mécanisme d'inférence/interpolation conventionnel du modèle TS, à remplacer l'expression de la moyenne pondérée (3.19) afin d'adoucir l'interpolation. Dans le cadre de l'identification des systèmes, un système flou approxime typiquement un modèle de régression dynamique non linéaire de la forme :

$$y(k+1)= f_{NL}(\boldsymbol{x}(\boldsymbol{k})) \quad (2.23)$$

où f_{NL} représente la fonction non linéaire et le vecteur de régression **x**(*k*) à l'instant *k* contient une collection des entrées *u* et des sorties *y* précédentes du système. Bien que les modèles de Mamdani et de Takagi-Sugeno soient les plus utilisés, dans le contexte des systèmes dynamiques le modèle TS l'est plus fréquemment51 car il est mieux adapté pour le traitement et l'exploitation numérique des systèmes à entrées/sorties multiples. Les règles du *modèle dynamique TS* prennent alors la forme générale suivante :

R_i: **Si z(k) : z(**k**) est** A_i **Alors** $y_i(k+1) = \theta_i^T w(k)$, i=1,…… , r (2.24)

où les variables de l'antécédent **z**(*k*) et du conséquent **w**(*k*) sont usuellement choisies à partir du vecteur de régression **x**(*k*) . Le modèle a deux jeux de paramètres, les paramètres $\boldsymbol{\theta}_i$ des conséquents et les paramètres définissant les fonctions d'appartenance pour les sousensembles flous$\mathbf{A}_i$. Ainsi, le modèle flou de type Takagi-Sugeno peut approximer les systèmes non linéaires avec des non linéarités douces et abruptes (à travers la structure des conséquents et la forme des fonctions d'appartenance). Il permet de faire un choix spécifique des variables de l'antécédent et du conséquent (e.g., systèmes Wiener et Hammerstein) [36] et de modéliser des structures dynamiques qui changent en fonction de variables connues (systèmes commutés, modes de défaillance, etc.) [37].

Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes particulièrement intéressés aux modèles dynamiques affines Takagi-Sugeno en temps discret sous la forme Non Linéaire Auto-Régressive avec entrée eXogène (NARX). Ce type de modèle établi une relation entre les valeurs précédents des entrées et sorties avec la sortie prédite *y*ˆ , de la manière suivante :

$$y(k+1)=f_{NL}\left(y(k),\dots,y(k-n_y+1),u(k),\dots,u(k-n_u+1)\right) \quad (2.25)$$

où *k* dénote l'instant d'échantillonnage, *ny* et *nu* sont des entiers liés à l'ordre (structure) du système. Une fois que la structure appropriée est établie, la fonction *fNL* peut être approximée en utilisant une régression statique non linéaire, correspondant dans notre cas au modèle flou de type TS. Dans le modèle NARX, le vecteur de régression est composé par un certain nombre d'entrées et de sorties précédentes, $\mathbf{x} = [y(k),\dots,y(k-n_y+1),u(k),\dots,u(k-n_u+1)]^T$

et *y*ˆ(*k* +1) est la sortie prédite. Le cas des systèmes avec retard pur entre l'entrée et la sortie peut être directement incorporé sur le vecteur de régression sous la forme donnée par $\mathbf{x} = [y(k),\dots,y(k-n_y+1),u(k-n_d+1),\dots,u(k-n_d-n_u+2)]^T$, où *nd* est une valeur entière du retard en

nombre d'échantillons. Par simplicité, nous prenons par la suite n_d = 1

Dans ce cas les règles du *modèle dynamique affine TS* prennent la forme :

Ri : **Si y**(k) est A_{i1} **et** y(k-1) est A_{i2} **et…….. et** $y(k- n_y+1)$ est A_{iny}

Et u(k) est B_{i1} **et u**y(k-1) est B_{i2} **et…….. et** $u(k- n_y+1)$ est A_{inU}

Alors :

$$y_i(k+1)=\sum_{j=1}^{n_y} a_{ij}y(k-j+1)+\sum_{j=1}^{n_u} b_{iju}u(k-j+1)+d_i, \qquad i=1,\dots\dots,r \qquad (2.26)$$

La sortie globale du modèle est calculée à partir de l'expression :

$$y(k+1)=\sum_{i=1}^{r} \lambda_i(k)\, y_i(k+1) \qquad (2.27)$$

Dans laquelle $\lambda_i(k) \in [0,1]$ est le degré normalisé d'accomplissement conformément à l'expression (2.16) et

$$\sum_{i=1}^{r} \lambda_i(k)=1$$

Il faut remarquer que le modèle flou dynamique Takagi-Sugeno représenté par les règles de la forme (2.26) inclut aussi le cas *di* = 0 dit homogène [11] ou linéaire [33].
Cependant, il convient également de souligner que le terme "linéaire" signifie tout simplement que la sortie individuelle de chaque règle est une combinaison linéaire des régresseurs. En effet, le modèle dynamique représenté par l'expression (2.26) est en réalité non linéaire car les coefficients du modèle dépendent non linéairement des entrées et sorties du système via le degré normalisé d'accomplissement. Le fait que le terme indépendant *di* ne soit pas considéré dans le modèle homogène limite ces capacités d'approximation par rapport au modèle affine, mais d'autre part, facilite énormément la synthèse de la commande ainsi que l'analyse de la stabilité. En effet, certaines méthodes ont été développés pour la synthèse de contrôleurs avec des caractéristiques de performance désiré en boucle fermé [38] [33] ainsi que pour l'analyse de la stabilité [31] [39].
Dans le cadre de la modélisation de systèmes, le modèle flou dynamique de type Takagi-Sugeno permet aussi la représentation d'autres structures non linéaires entrée-sortie utilisés fréquemment, telles que les formes NOE[52] et $NARMAX$[53]. Cependant, dans une approche d'identification à partir des données entrée-sortie, le problème de régression dans ces structures doit être résolu itérativement car le vecteur de régression ne peut pas être construit directement à partir des données puisque il contient les valeurs précédentes de la sortie du modèle. En principe, les méthodes d'identification par *clustering*, que nous aborderons dans la section 2.3, peuvent être appliquées à ces structures, mais comme ces méthodes de

clustering flou sont itératives, cela amène à un problème d'optimisation plutôt complexe [11]. Par la suite nous nous sommes intéressés aux modèles dynamiques affines TS du type NARX.

D'autre part, dans le modèle dynamique représenté par (2.26)-(2.27) il est supposé que *y* est un scalaire, c'est-à-dire, le système étudié est un système de type MISO54. Avec les modèles entrée-sortie, les systèmes MIMO55 peuvent être représentés de deux manières : soit la fonction non linéaire *fNL* est une fonction vectorielle, soit le système MIMO est décomposé dans un ensemble de systèmes MISO couplés. En modélisation flou l'approche de

décomposition est la plus adoptée. La raison est qu'il y a plus de flexibilité si chaque sortie est associée à différent type de non linéarité pour la même région de l'espace de l'antécédent [11]. En décomposant le système MIMO en plusieurs sous-systèmes MISO, le nombre de fonctions d'appartenance et de règles peut être réduit. Dans la suite de ce mémoire nous utilisons cette dernière approche.

En plus de la représentation des structures entrée-sortie les plus fréquentes, les modèles flou dynamiques de type Takagi-Sugeno peuvent aussi représenter les systèmes non linéaires sous la forme d'espace d'état :

$$\mathbf{x}(k+1) = g(\mathbf{x}(k),\mathbf{u}(k))$$
$$\mathbf{y}(k) = f(\mathbf{x}(k)) \qquad (2.28)$$

où *g* et *h* sont des fonctions statiques. La fonction *g* , nommée la fonction de transition d'état, établie la correspondance entre l'état actuel **x**(*k*) et l'entrée **u**(*k*) avec le nouveau état **x**(*k* +1) . Quant à elle, la fonction *f* établie la correspondance entre l'état actuel **x**(*k*) et la sortie du système **y**(*k*) . Un exemple d'une représentation basée sur des règles d'un système non linéaire dans l'espace d'état est le modèle dynamique Takagi-Sugeno suivant :

$$\boldsymbol{R_i}: \textbf{Si } \mathbf{x}(k) \text{ est } \boldsymbol{A_i} \textbf{ et } \mathbf{u}(k) \text{ est } \boldsymbol{B_i} \textbf{ Alors} \begin{cases} x(k+1) = \boldsymbol{A_i}\, x(k) + \boldsymbol{B_i}\, u(k) \\ Y(k) = \boldsymbol{C_i}\, x(k) \end{cases} , i = 1 ;\ldots , r \qquad (2.29)$$

Le modèle comporte *r* règles dans lesquelles$\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{i}}$ et $\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{i}}$ représentent des sous-ensembles flous, les matrices $\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{i}}$, $\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{i}}$et $\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{i}}$ sont des matrices de dimensions appropriés associés à la représentation de la dynamique du système. La sortie globale du modèle est déterminée en utilisant le même principe de calcul (moyenne pondérée) présenté dans l'équation (2.27).

Comme nous l'avons vu, le modèle dynamique flou de type Takagi-Sugeno comporte les paramètres de l'antécédent et du conséquent pour chacune des règles. Dans la section suivante nous donnons un aperçu général sur la construction des modèles flous. Nous nous sommes plus spécialement intéressés à l'identification de modèles dynamiques TS en utilisant des données entrée-sortie du procédé. Nous développerons l'approche d'identification basée sur des méthodes de clustering floue .

II.4 conclusion :

Les concepts de logiques floues ont étés introduits dans diverses étapes du cycle de vie d'un produit, que ce soit pour les prises de décision ou la validation d'une conception pour l'assemblage, néanmoins l'utilisation de ces techniques pour traduire les attentes des clients est originale. Utiliser la logique floue permet de modéliser de manière formelle les aspirations des clients. Lors de la conception d'une offre produit, cette information structurée peut alors être utilisée pour fixer les caractéristiques des différents nouveaux produits.

III. Les systèmes photovoltaïques

III.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [40]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Ce phenomena fut. découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications. [41]

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

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

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en passant au système photovoltaïque complet et à ses trois types à savoir [42]:

- Les systèmes autonomes,
- Les systèmes connectés au réseau,
- Les systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV).

III.2 HISTORIQUE :

En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.

En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.

En 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque.

III.3. Potentiel solaire :

III.3.1. Potentiel solaire extraterrestre :

III.3.1.1. Rayonnement solaire extraterrestre :

Pour comprendre le comportement du rayonnement du soleil, les caractéristiques du corps Noir devrait être vues brièvement. Le " corps noir " est à la fois un absorbeur et un émetteur de

Rayonnement électromagnétique avec 100 % d'efficacité à toutes les longueurs d'ondes. La Distribution théorique des longueurs d'onde du rayonnement du corps noir est mathématiquement

décrite par l'équation de Planck comme suite : [43]

$$E_\lambda = \frac{A\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{\beta}{\lambda T}\right)-1} \qquad (3.1)$$

Avec,

A = 3.74x10-16 W/m2 ;

B = 14.39x 10-3 m.K ;

λ: Longueur d'onde en mètre ;

T : Température absolue en °K;

L'ensoleillement, qui représente le flux d'énergie émis par unité de temps et par unité de surface du soleil, exprimée en W/m^2est donné par la loi de Stefan-Boltzmann [44] :

$$Es = \sigma T^4 \quad (3.2)$$

Où σ=5.67*$10^{-8}$$W/m^2.K^4$ est la constante de Stefan-Boltzmann ;

T est la température absolue du corps noir.

L'ensoleillement reçu en dehors de l'atmosphère terrestre, nommée la constante solaire, peut être approximativement dérivée selon l'expression (1.3), si on suppose que le soleil est un corps noir [43] :

$$E_S A_S = E_0 A_{0T} \quad (3.3)$$

Avec

E_S : Eclairement de la surface du soleil ;

E_0 : Eclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelé constante solaire ;

A_S : Surface du soleil ;

A_{0T}: Surface de la sphère dont le rayon est l'orbite de la terre/soleil ;

La figure (1.1) montre la géométrie schématique des rapports terre-soleil. En substituant E_s par l'équation (3.2) et T par 5762°K, on obtient : E_0=1360 W/m^2

Puisque l'orbite de la terre ROT n'est pas entièrement constant, E0 change légèrement tout au long de l'année, on peut déduire que 1300 W/m2 <E_0< 1390 W/m².

Les mesures, par satellite, indiquent que la valeur moyenne de l'année E_0 est de 1367W/m^2; qui est dans la gamme précédente.

En raison de l'orbite elliptique de la terre, l'ensoleillement extraterrestre E0 sur une surface perpendiculaire au faisceau du soleil dans le jour n de l'année est donné (n variant de 1 à 365 et ce du 01/01 au 31/12 de l'année) par l'équation suivante [45]:

$$E_0 = (1 + 0.033\frac{2\pi n}{365})E_0 \quad (3.4)$$

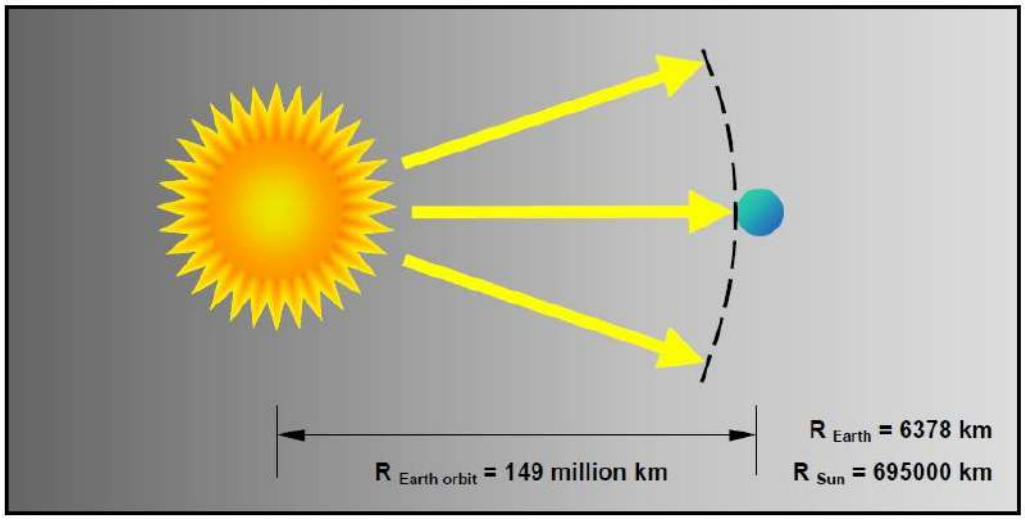


Figure 3-1.*Géométrie schématique des rapports terre-soleil* [43]**.**

III.3.1.2. Temps solaire vrai (TSV) :

Le temps, en heures, appliqué dans les calcules d'énergie solaire est nommé : le temps solaires vrai, là où le soleil croise le méridien de l'observateur à 12:00. La conversion du temps standard local (TSL) au TSV est faite par l'équation (3.5)

$$T_{TSV} = T_{TSL} + \frac{12h}{\pi}\left(\Lambda_{\ ref} - \Lambda\ \right)B_t(n) \qquad (3.5)$$

Avec :

Λ est longitude géographique du site ;

$\Lambda_{\ ref}$ est longitude de référence du TSL ;

*B*t(n), en heures, est un facteur additionnel qui compte pour les perturbations de rotation de la terre,(on peut ajouter jusqu'à1H) ; il est donné par l'équation (3.6): [46]

$$B_t(n) = 0.645\sin\left(\frac{2\pi(n-81)}{364}\right) - 1255\cos\left(\frac{2\pi(n-81)}{364}\right) - 0.025\sin\left(\frac{2\pi(n-81)}{364}\right) \qquad (3.6)$$

III.3.1.3. Position du soleil

La position du soleil sur la sphère céleste est donnée par l'angle d'altitude γ et l'angle d'azimut ψ figure (3.2). Elle dépend de la date, la période du jour, et de la position géographique de l'observateur [45].

La date, en nombre de jours n, détermine l'angle solaire de déclinaison δ de la terre, qui est au point O en radian. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\delta = 23.45\frac{\pi}{180}\sin\left(2\pi\frac{284+n}{364}\right) \qquad (3.7)$$

Le temps de la journée, en heures, est le reflet d'un angle nommé angle horaire du soleil, en radian équivalant à l'heure, qui est donné par l'équation suivante :

$$\omega = (TSV - 12h)\frac{\pi}{12h} \qquad (3.8)$$

L'altitude γ et l'azimut ψ à un certain temps et date, à longitude Λ et à latitude φ, sont alors calculés à partir des équations (3.9) et (3.10) [10]:

$$\sin(\gamma) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (3.9)$$

$$\cos(\Psi) = \frac{\sin(\gamma)\sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(\varphi)\cos(\gamma)} \quad (3.10)$$

On note que l'azimut solaire ψ est négatif le matin et positif l'après-midi. Pour des positions sur l'hémisphère nordique, l'angle d'altitude γ est positif entre le lever et le coucher du soleil; tandis que sur l'hémisphère méridional, il est négatif. L'angle de déclinaison δ est défini positif pendant l'été sur l'hémisphère nordique. L'angle de latitude géographique φ est positif sur l'hémisphère nord et négatif sur l'hémisphère sud.

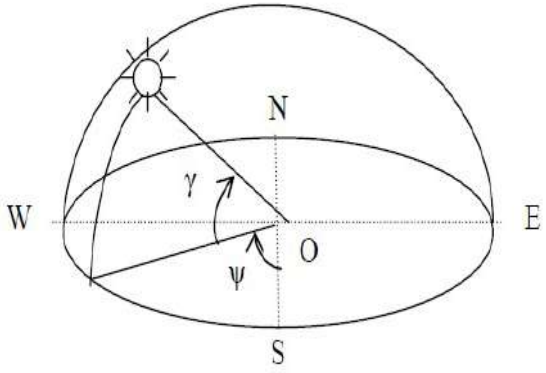


Figure 3-2. *La position du soleil observée d'après l'origine O.*

III.3.1.4. Géométrie d'orientation : collecteur- faisceau du soleil :

La position du soleil vis-à-vis d'un collecteur orienté arbitrairement est déterminée par l'angle d'incidence θi du rayon du soleil figure (3.3). Pour le plan d'horizon, l'angle d'incidence est égal à l'angle zénith, équation (3.11) :

$$\cos(\theta i) = \sin(\gamma) \quad (3.11)$$

Pour un collecteur incliné avec l'angle β et l'azimut α, l'angle d'incidence θi est calculé à partir de:

$$\cos(\theta i) = \sin(\gamma)\cos(\beta) + \cos(\gamma)\sin(\beta)\cos(\alpha - \Psi) \quad (3.12)$$

Là où l'angle d'azimut α erre d'est-ouest et zéro pour l'orientation sud. L'ensoleillement extraterrestre E0 reçue par un collecteur arbitrairement orienté est donnée par l'équation

$$E_{0\alpha\beta} = E_0 \cos(\theta i) \quad (3.13)$$

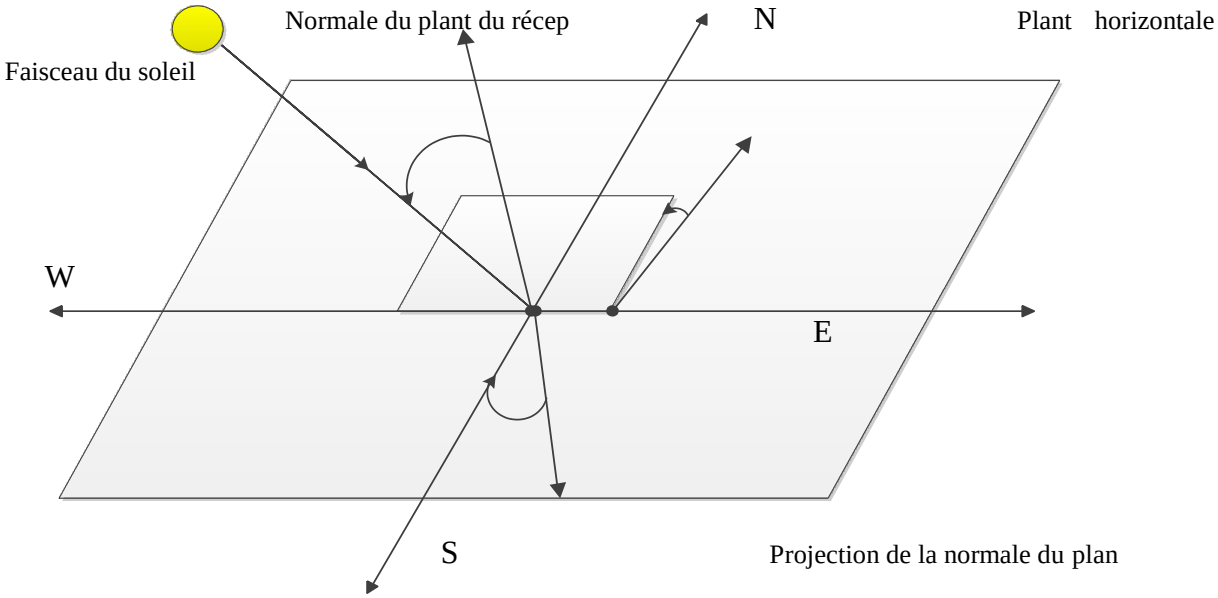


Figure 3-3.*Position du soleil observée d'après l'origine O.*

III.3.2. Rayonnement solaire :

III.3.2.1. Spectre solaire :

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature:

- **Le rayonnement direct**

La conversion du rayonnement direct ED est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

Le rayonnement direct est converti pour un plan avec un angle d'azimut α et d'inclinaison β selon l'équation suivante :

$$E_{D\alpha\beta} = E_D \frac{\cos(\theta i)}{\sin(\gamma)} \qquad (3.14)$$

Avec γ et θi sont donnés selon les équations (3.9) et (3.12).

On note que le paramètre $E_{D\alpha\beta}$peut être mesuré par un instrument nommé «Pyroheliometer» [43],

qui doit être monté sur la monture du générateur PV.

- **Le rayonnement diffus : c'**est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- **Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol** : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc.…).
- **Le rayonnement global :** le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol) [45]. Dans la figure ci-dessous figure (3.4) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

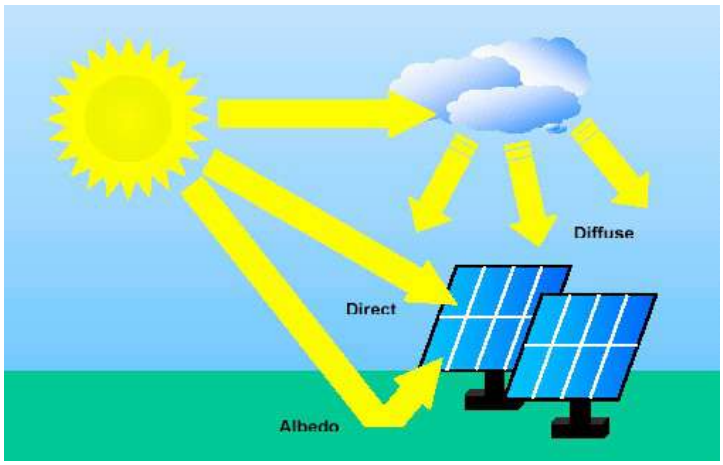


Figure 3-4. *Types de rayonnement solaire reçus au sol.*

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G**),** il s'exprime en watts parmètre carré (W/m²).

La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [42]:.

Dans la figure (3.6) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil.

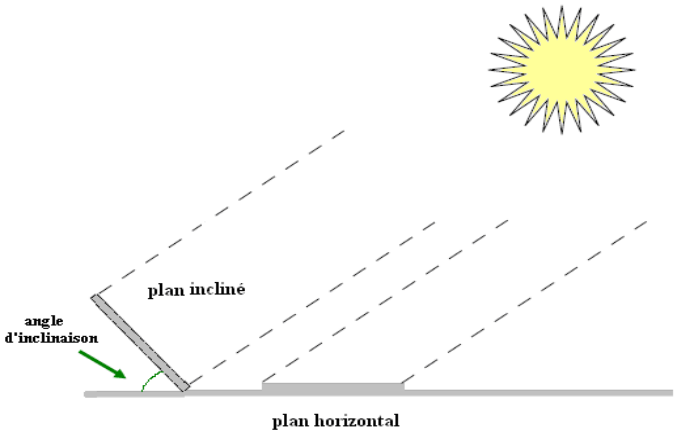


Figure 3-5. *Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.*

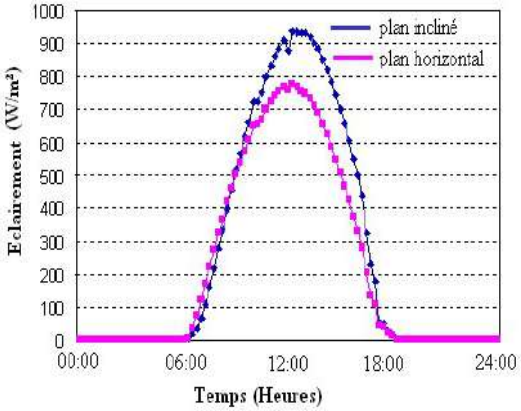


Figure 3-6. *Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.*

III.4. Masse d'air :

On appelle masse d'air *AM* , la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith [47].

$$AM \approx \frac{1}{\sin\theta} \qquad (3.15)$$

Où :

θ : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg).

Le spectre solaire AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et AM1.5 pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith.

Le nombre ″1.5″ indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith [45] .

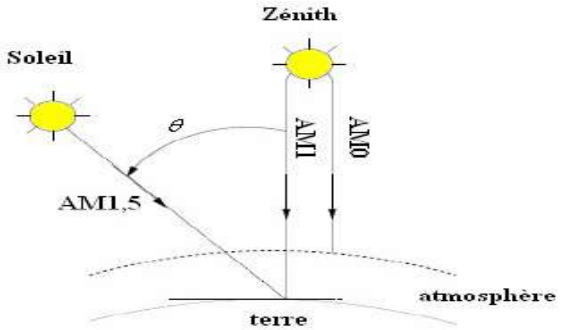


Figure 3-7. *Description du nombre de masse d'air.*

III.5. Semi conducteur :

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique [48].

III.5.1.Formation de la jonction PN :

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, figure (3.8).

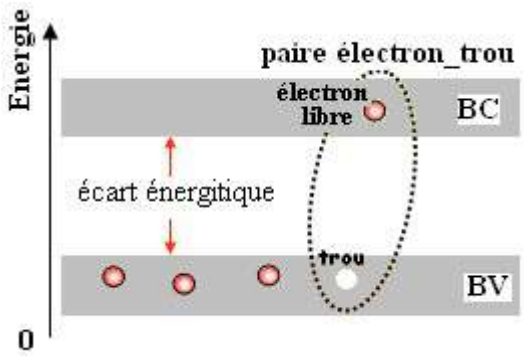


Figure 3-8. *Génération de la paire électron-trou.*

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode.

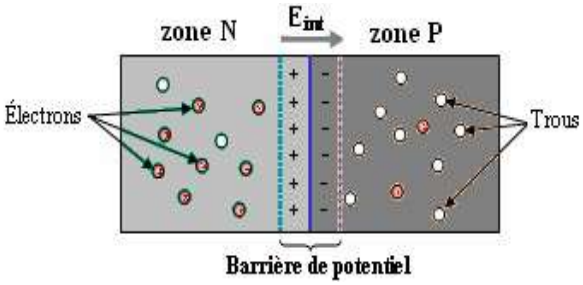


Figure 3-9. *La jonction PN.*

III.5.2.Principe de fonctionnementde la cellule photovoltaique :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement a base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [42].

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure (3-10) ci-dessous.

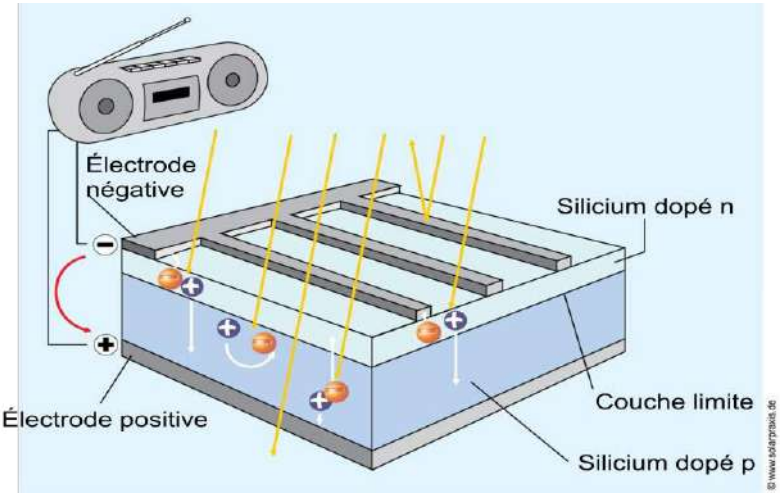


Figure 3-10. *Structure d'une cellule photovoltaïque.*

III.5.3.type et rendemantdes cellules photovoltaiques :

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [45].

- **Les cellules monocristallines:** Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le cout le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- **Les cellules polycristallines**: Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication st moins important, cependant leur rendement est plus faible.
- **Les cellules amorphes**: Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.
- **Rendement d'une cellule :** Le tableau suivant (3-1) présente les différents types des cellules avec leur rendement.

Tableau 3-1.Les différents types des cellules avec leur rendement.

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	**13%**	**5-9%**
Silicium polycristallin (p-Si)	**19,8%**	**11 à 15 %**
Silicium monocristallin (m-Si)	**24,7%**	**13 à 17%**

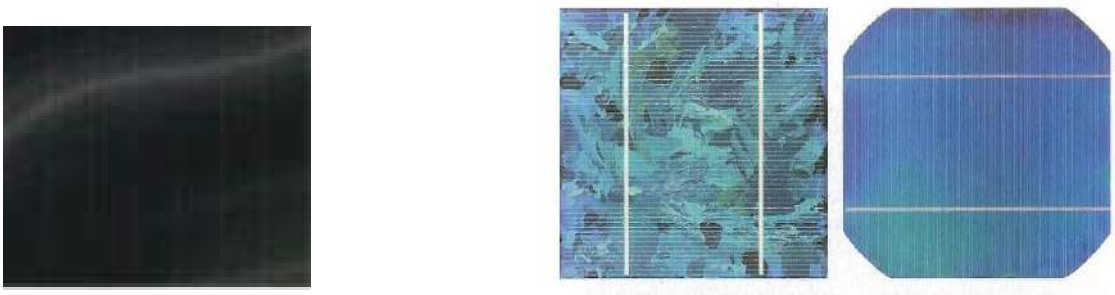


Figure 3-11. *Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.*

$$\eta_{STC} = \frac{P_M}{E_{STC} \times S_{cellule}} \quad (3.16)$$

Avec :

η_{STC}:Le rendement de la cellule photovoltaïque ;

P_M: La puissance produite par le générateur PV ;

E_{STC}: L'éclairement absorbé par la cellule ;

$S_{cellule}$: La surface de la cellule [m²].

- Ce rendement dépend plusieurs facteurs [49]:

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

III.6. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [50] :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

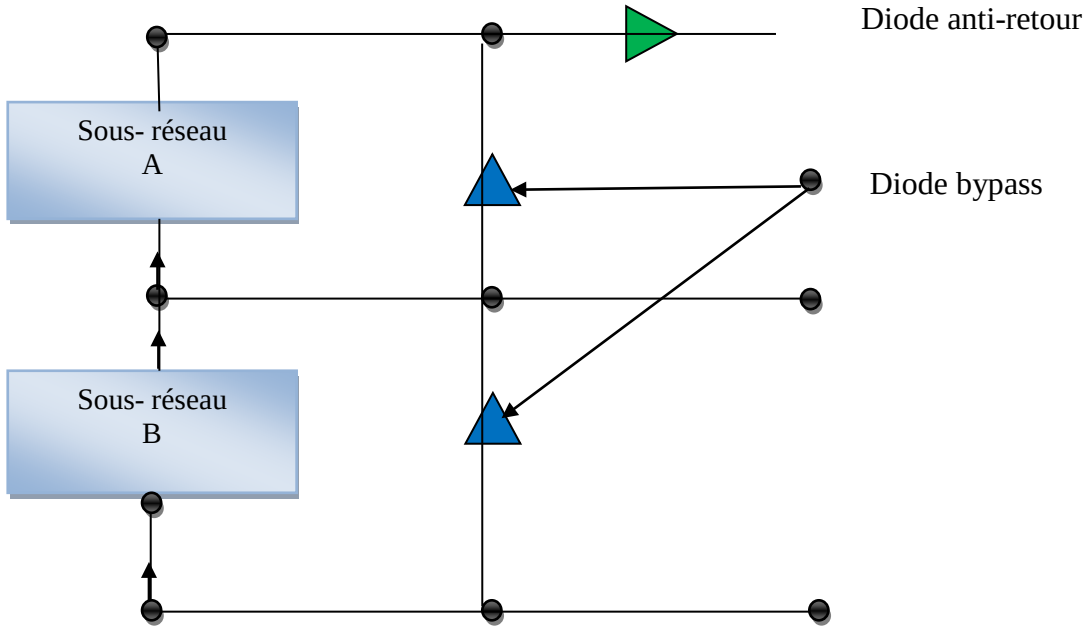


Figure 3-12. *Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [50].*

III.7. Les systèmes photovoltaïques :

Partie générale :

On ne peut pas considérer les modules photovoltaïques comme simples générateurs d'énergie électrique en remplacement d'un réseau, mais associer étroitement ces modules à un système complet pour une application bien spécifique correspondant à un besoin défini.
Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilises sont de deux types :

III.7.1. Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique :

Batterie d'accumulateurs électrochimiques, ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation:
- soit directement en courant continu.
-soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu- alternatif (onduleur).

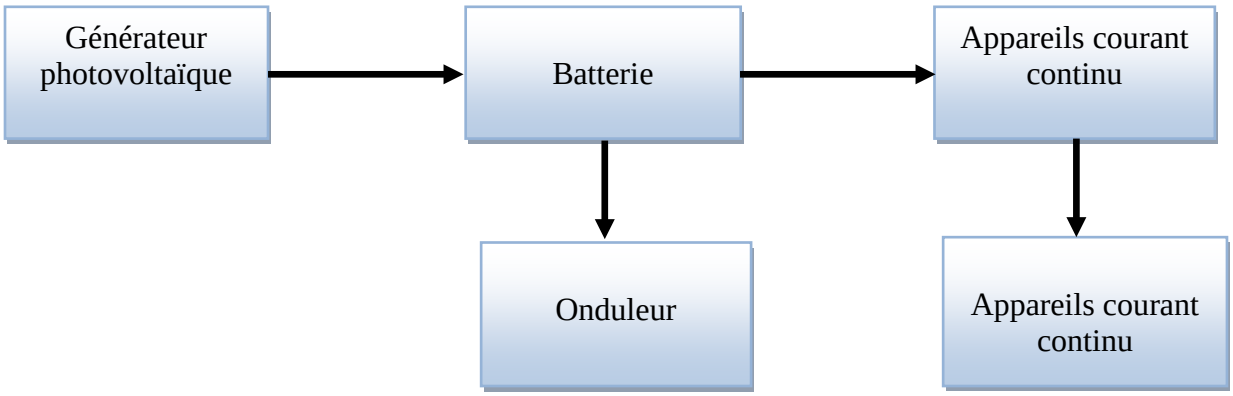


Figure 3-13. *Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.*

III.7.2. Les systèmes à couplage direct sans batterie :

(Fonctionnement dit aussi < au fil du soleil>).

Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu, adaptateur d'impédance.

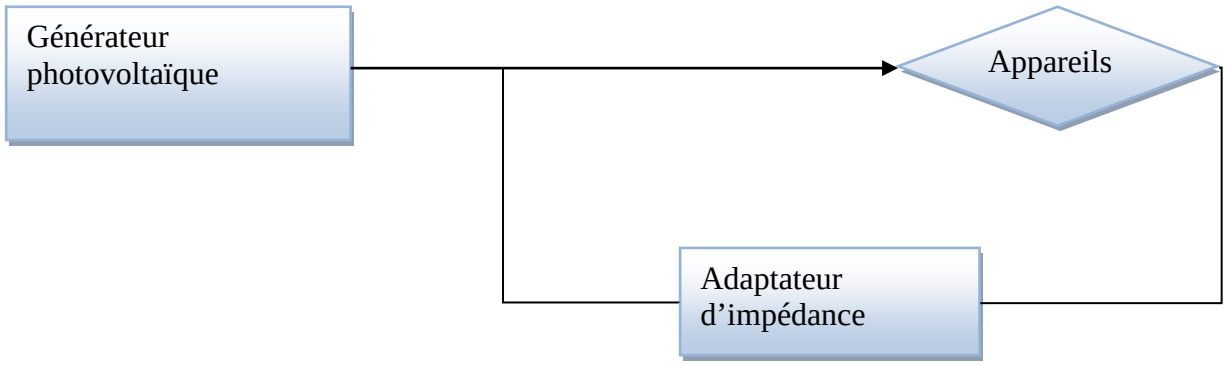


Figure 3-14. *Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct.*

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à un stockage mais qui ne sera pas sous forme électrochimique.

Exemple :

– pompage ⇒ stockage par réservoir d'eau.

– Réfrigération ⇒ stockage de froid.

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères : simplicité, application, environnement, etc.

Toutefois l'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge constituée, soit d'une batterie, d'une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules solaires.

Comme il est vu précédemment, on recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant continu ou courant alternatif.

Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma généralisé dans la figure (3-15) ci-dessous.

Cette représentation synoptique recouvre à peu prés tous les cas de figure (3-14) mais il est bien certain qu'un système photovoltaïque ne comporte en général qu'un certain nombre des éléments représentés ici.

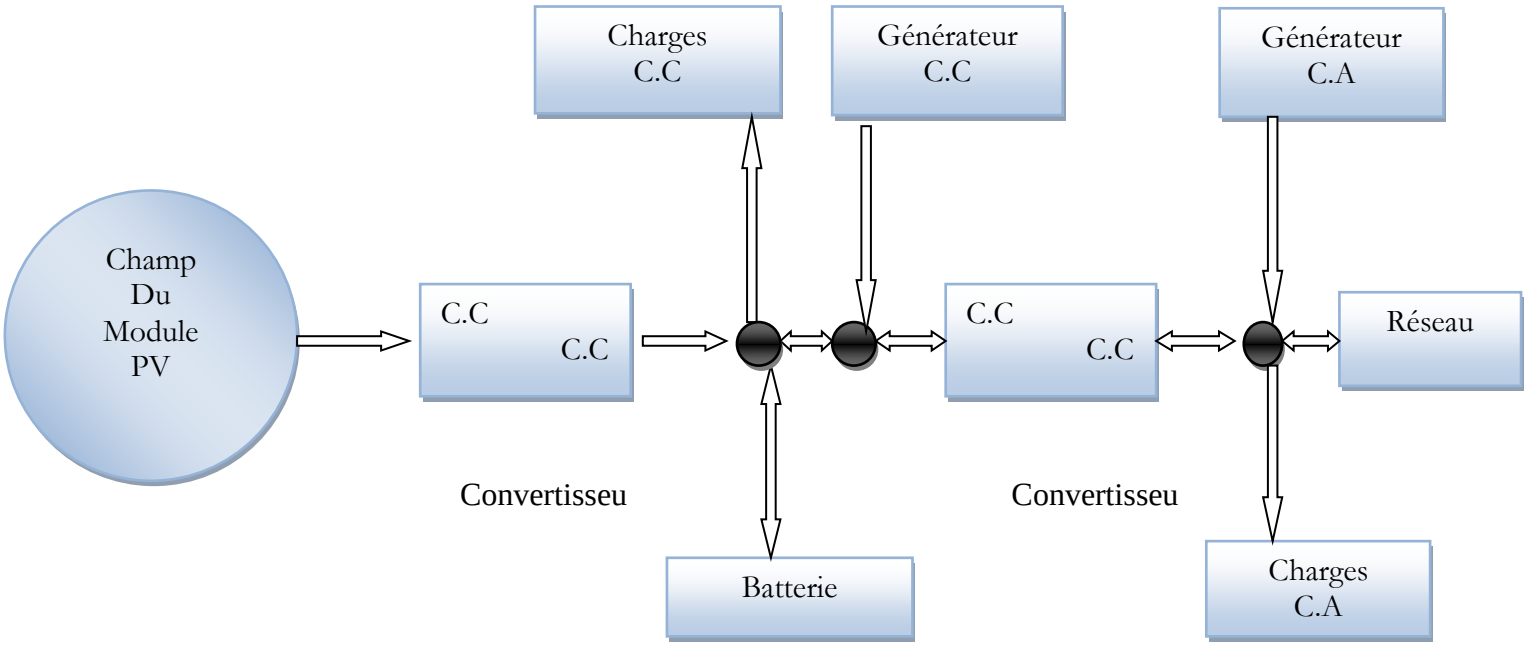


Figure 3-15. *Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.*

III.8.Secteurs daplication :

Domaine spatial : c'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.

Télécommunications : Téléphonie rurale, radiotéléphonie,...

Sites isolés : Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...

Acquisition de données : L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).

Domaine du transport : Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire.

III.9.Aventages et inconvénients de l'énergie photovoltaique :

III.9.1. inconvénients :

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

III.9.2. Aventages :

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

III.10Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté le potentiel solaire, le principe de la conversion PV et les cellules monocristallines qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation des systèmes photovoltaïques et leurs secteurs d'application.

IV. Modalisation floue à chaine photovoltaïque

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation » , «Logique floue». Ce système est comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « ***perturbation et observation*** » , «**Logique floue**» ainsi qu'une charge.

La modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simpower.

IV.2. L'outil Matlab/simulik :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal .En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels quisont parfaitement intégrés à l'ensemble.

IV.2.1.Simpower

Est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [51].

IV.3. Système photovoltaïque proposée :

La figure (IV.1) représente le schéma synoptique d'un système PV alimente une charge résistive (*RS*) :

• Le générateur PV YGE 60 cell série (YL245P-29b) est en silicium monocristallin est constitué de

60 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 245 W, un courant de 8.28 A sous une tension optimale de 29.6 V.

• Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur (boost) pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 29.6 V.

• La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui

dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque.

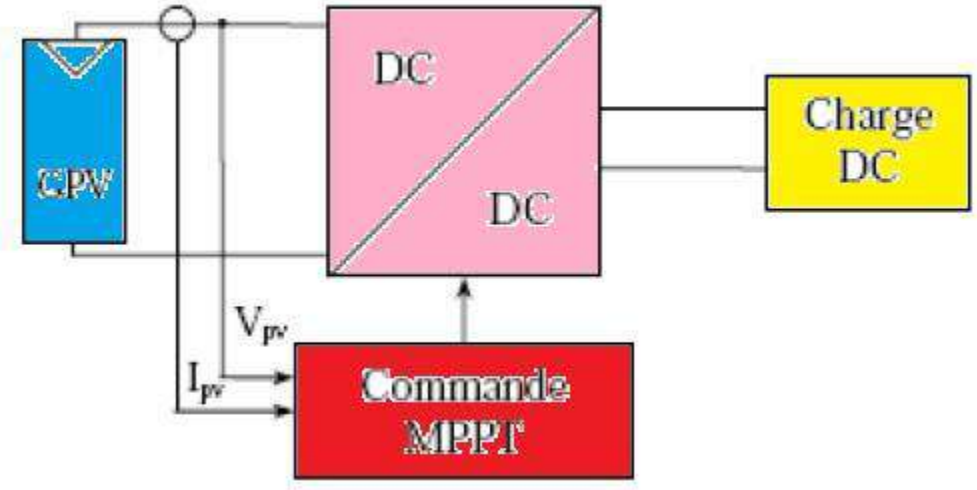


Figure 4.1 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC). **[52][53]**

IV.4.Simulation du générateur photovoltaïque :

IV.4.1. Modèle GPV

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source.[54]. On présente le schéma du circuit électrique par la figure (IV.2):

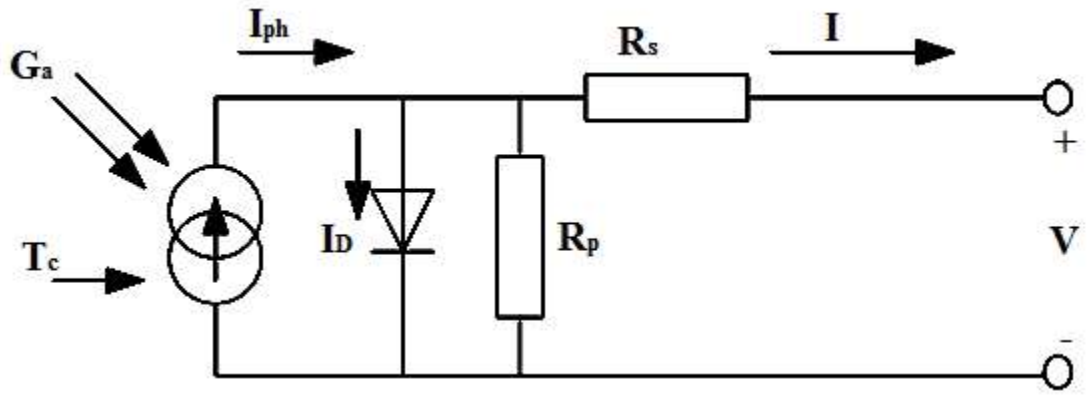


Figure 4.2 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

IV.4.2. Modèle du module photovoltaïque :

Le modèle suivant utilise des méthode différentes pour calculer la résistance série et la résistance parallèle. Par exemple, PV YGE 60 cell série (YL245P-29b) est fait de 60 cellules solaires en série et fournit P_{mpp}=245 W de puissance maximum nominale. La tension maximum de point de puissance est V_{mpp}=29.6 V et le courant fourni au point de puissance maximum est I_{mpp}=8.28 A. Les paramètres de PV YGE 60 cell série (YL245P-29b) sont donnés dans le tableau IV. qui est essentiel pour modeler le pneaau photovoltaïque PV. (YL245P-29b)

Grandeurs	Valeur
Puissance maximale	245 W
Tension eu MPP (V_{mp})	29.6 V
Courant eu MPP (I_{mp})	8.28 A
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.83 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	37.5 V
Coefficient de sensibilité de la tension à la température	-0.42 V/K
Coefficient de sensibilité de la l'intensité à la température	+0.05 V/K

Tableau IV.1 caractéristiques du module PV YGE 60 cell série (YL245P-29b)

IV.4.3. Schéma générateur photovoltaïque dans Matlab :

La simulation de la générateur photovoltaïque est réalisée avec le bloc de Simulink. Le modèle de matlab de générateur photovoltaïque est basé sur la référance [55]. Certaines variables sont modifiées pour l'application avec la pourssuit de point de puissance maximale. Les paramètres d'entrée exigées pour le modèle sont :

Imp : courant à la puissance maximale au STC.

Ns : nombre de cellules en série

Nss : nombre de modules en série

A : 1.3977, constante de diode

k : 1.38e-23, constante de Boltzmann

Iscn : tension nominale de court-circuit

Kp : Coefficient de la température de tension

Ki : coefficient de température courant

Vmp : puissance maximum de tension au STC.

La fiche technique des caractéristiques de PV de est employée pour calculer les valeurs nécessaire pour Rs, Rp.et d'autres paramètres pour le point de puissance maximale. Le montage initial est employé pour obtenir les caractéristiques de la courbe I-V de paneau PV et pour prouver le point de puissance maximale du PV. Le modèle du PV est employé avec le convertisseur DCDC(Boost) pour déterminer l'exécution du traqueur le point de puissance maximale.

Le modèle du générateur photovoltaïque a été mis en application dans Simulink suivant les indications de la figure (IV.3). La température et l'irradiante sont spécifiées. La simulation laisse avoir les caractéristiques I-V et P-V. Le modèle de Simulink emploie une source courante, et une source de tension et la valeur de résistance en série et en parallèle du PV.

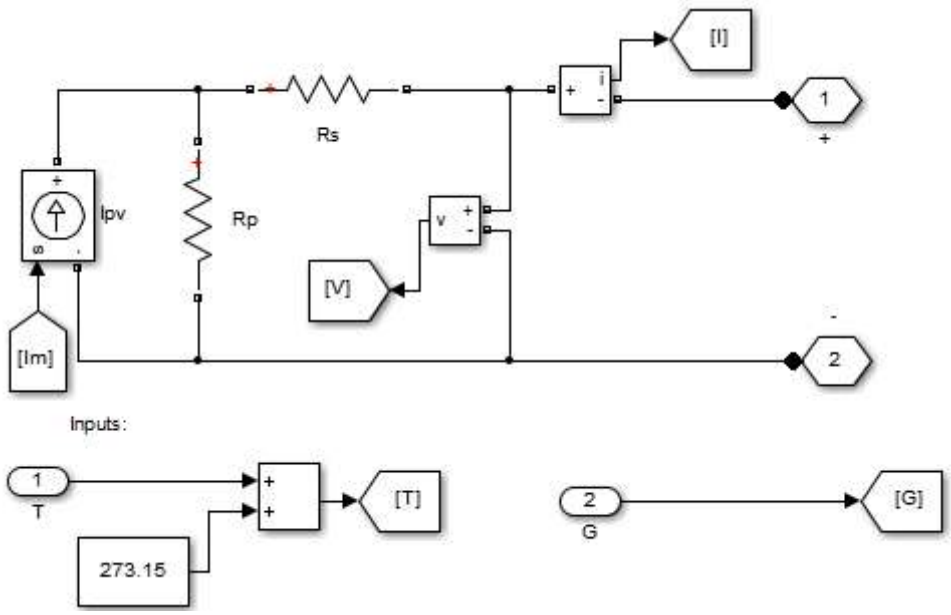


Figure 4.3 : simulation du module de PV.

Le nombre de modules en série et le parallèle sont données avec le Nss et la Npp. Le résultat du courentI_m est employé pour le bloc de Simulink comme source de courante pour obtenir la tension et le courant I_{pv} fournis du PV.

La figure (IV.4) est le bloc qui représente le paneau photovoltaique et qui peut être employé avec différents circuits de puissance dans Simulink. On peut noter que les entrées du PV sont l'irradiation et la température, les sorties sont la tension V_{pv} et le courant I_{pv} [54].

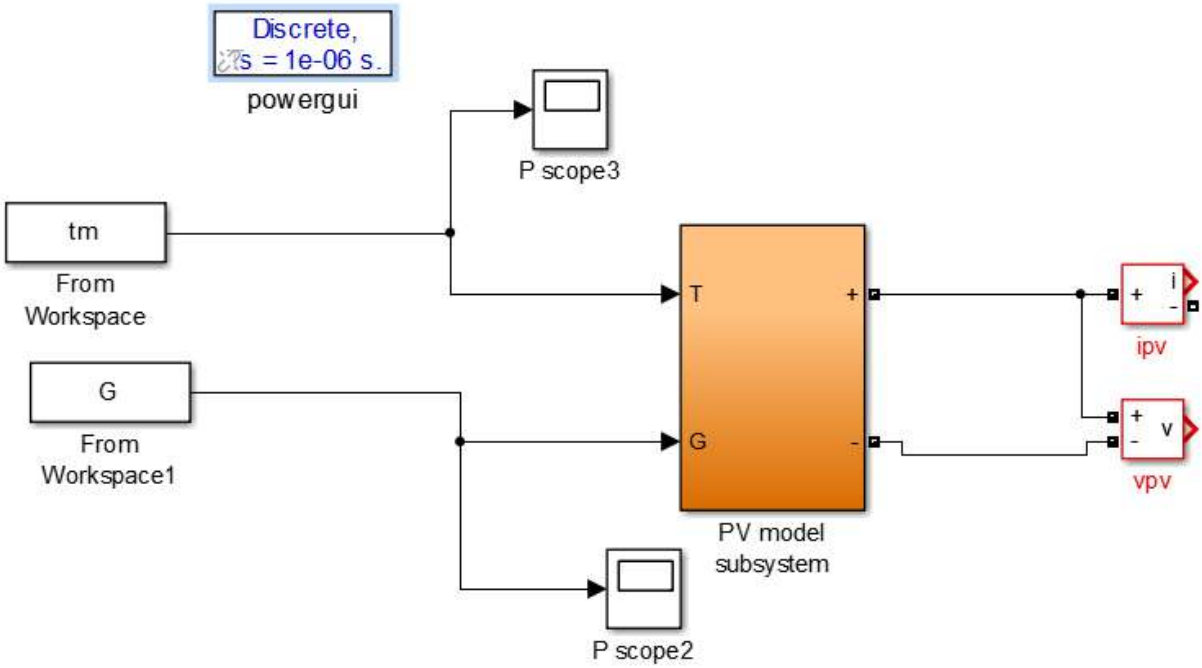


Figure 4.4: bloc de Simulink de générateur photovoltaïque.

La figure(IV.5) montre l'interface de masque de ce modèle de PV. Le paramètre d'entrée pour ce modèle est le courant photovoltaïque . La variation du courant du photovoltaïque varie la tension photovoltaïque de sortie. Le modèle de Simulink est dérivé du modèle décrit dans la partie de Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque [56][54]. Et les citer les l'équation :

- $I_m = I_{ph} - I_0(e^{qV_d/KT} - 1)$
- $I_{ph} \cong I_{sc}(T_1) = \left(\frac{G}{G_{nom}}\right) I_{sc}(T_{1,nom})$
- $I_0(T_1) = \frac{I_{ph}(T_1)}{\left(\frac{qV_{oc}}{e^{KT-1}}\right)}$

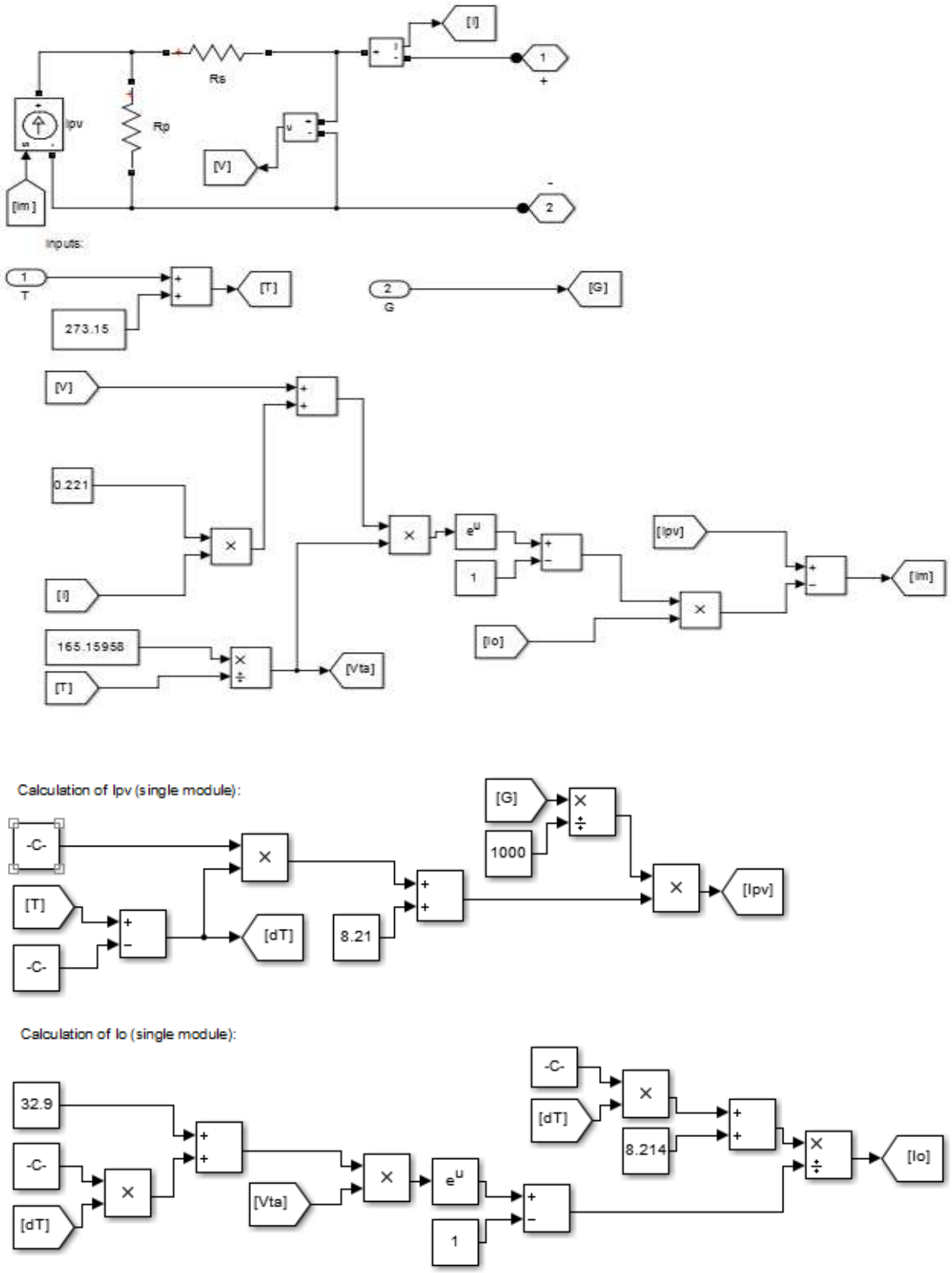


Figure 4.5 : Modèle de sous-système de Simulink de la rangée de photovoltaïque

IV.5. Modèle de Simulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT :

La figure (IV.6) montre schéma de convertisseur boost. L'entrée de convertisseur est la tension de sortie de panneau photovoltaïque. L'inductance et le condensateur ont besoin d'être spécifiés. La commande de commutation du transistor est obtenue à partir du contrôleur MPPT.

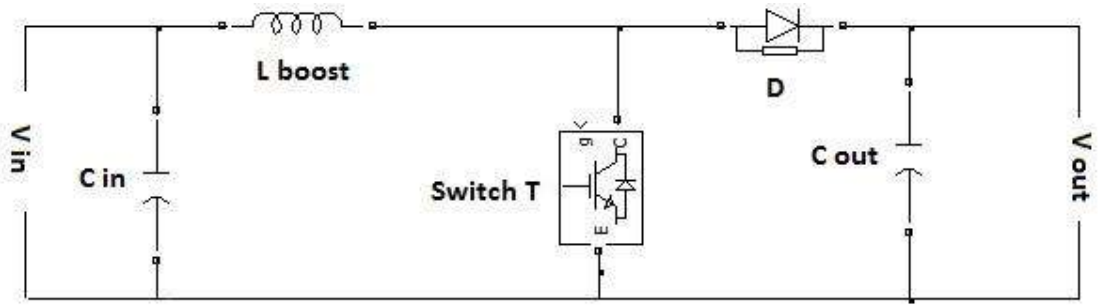


Figure 4.6 : Simulation de convertisseur boost

IV.6. Simulation de la méthode MPPT :

Le bloc de contrôleur du point de puissance maximale est montré sur la figure (IV.7) La tension et le courant de la paneau photovoltaïque sont les entrées, et le rapport cyclique (D) est la sortie. Le rapport cyclique est comparé à un signal triangulaire pour produire la MLI. La fréquence de signal triangulaire est la fréquence des impulsions du convertisseur boost.

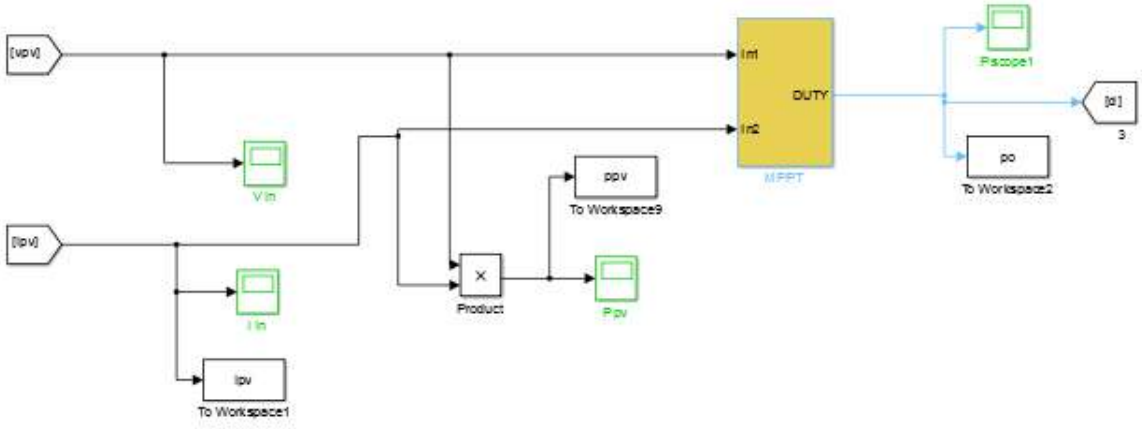


Figure 4.7 : Bloc de Simulink pour MPPT

Le rapport cyclique est augmenté ou diminué jusqu'à ce que le point de puissance maximale du photovoltaïque soit atteint. Le pas de rapport cyclique est constant, et il détermine l'efficacité et l'exactitude du contrôleur MPPT.

Un l'imitateur de valeur (0.01 0.9) est utilisé pour limiter le rapport cyclique.

IV.7 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) :

La figure (4.8) présente le système : le convertisseur boost, de panneau photovoltaïque et du contrôleur MPPT dans Simulink. Le système a une charge résistive pour tester la simulation.

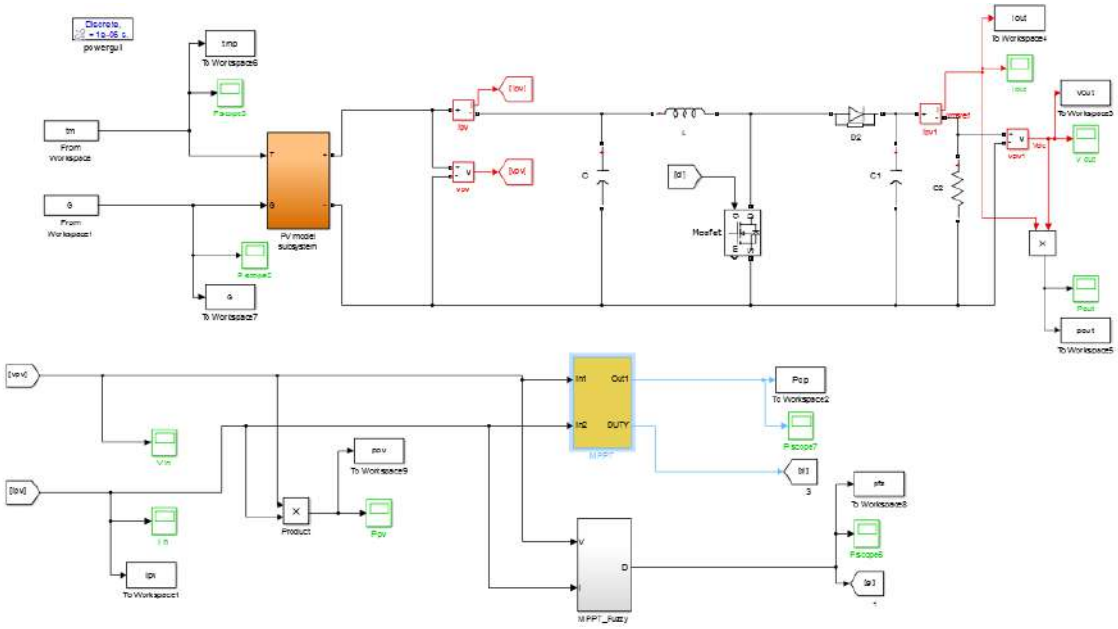


Figure 4.8 : *Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge).*

IV.8 Structure et simulation de la commande MPPT numérique «P&O»:

IV.8.1 Structure de la commande « perturbation et observation » :

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé. Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système. Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique (I-V) avec celle de la charge.

Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale.

La méthode de perturbation et d'observation « P&O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque Vpv et Ipv respectivement.

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O figure (III.16), en nous basant sur l'organigramme illustré sur la figure dans ce qui suit :

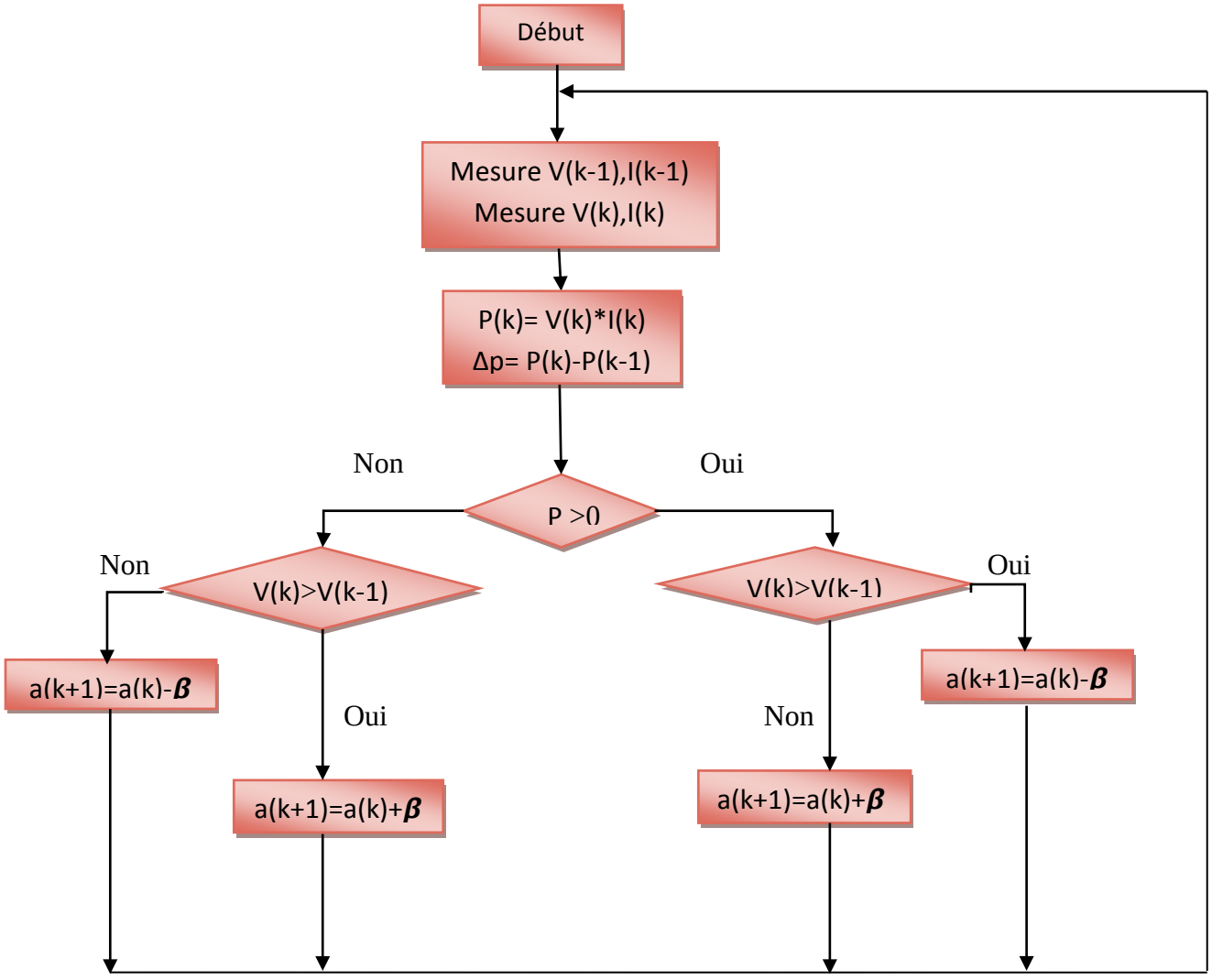


Figure 4.9 : Organigramme de l'algorithme P&O.

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DCDC survolteur.

IV.8.2 Simulation de l'algorithme P&O (T et G VARIABLE):

La figure (III.17) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT (P&O) :

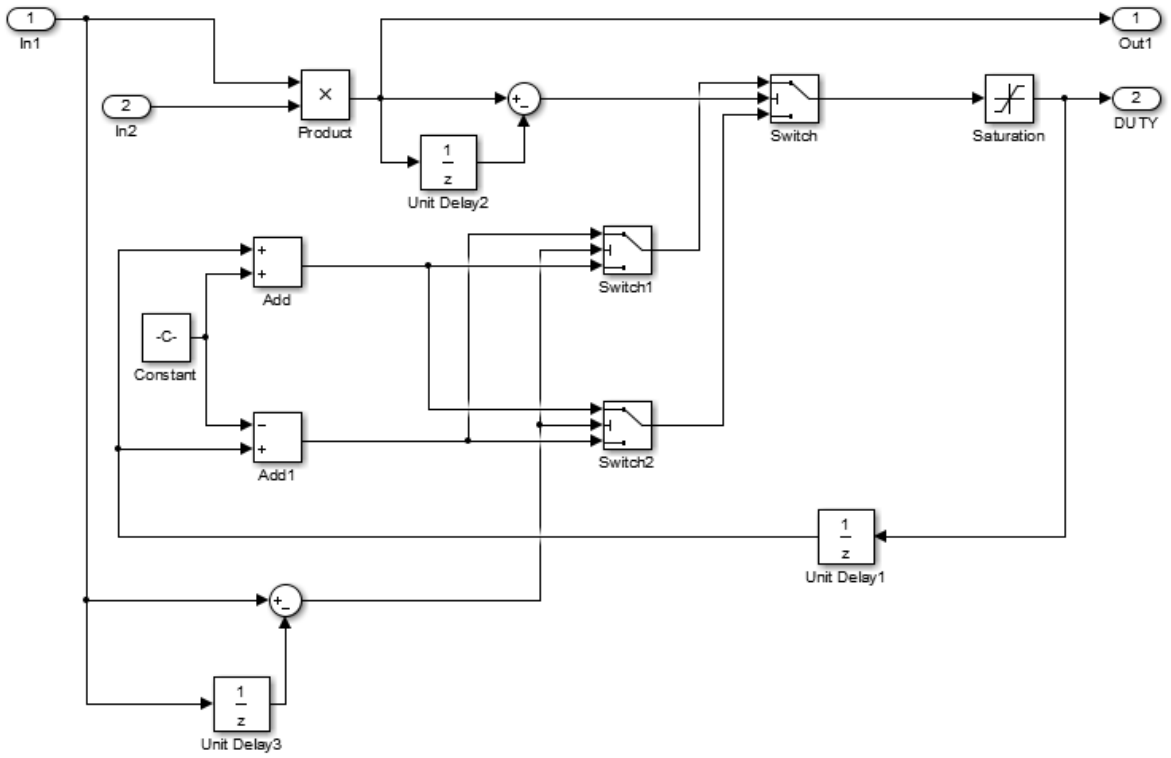


Figure 4.10 : Simulation de commande p&o.

IV. 9 Contrôleur MPPT flou :

La logique floue est une technique très puissante issue de la théorie des ensembles flous, pour combler la lacune entre la précision de la logique classique et l'imprécision du monde réel.

La logique floue ou la théorie des ensembles floue est une nouvelle méthode de commande MPPT permettant d'obtenir le point de puissance maximale (MPP). Le contrôleur flou fonctionne en deux modes de base grossier et fin [56]. Cet algorithme de commande comprend trois étapes, à savoir :

- lafuzzification,
- la méthode d'inférence,
- la défuzzification,

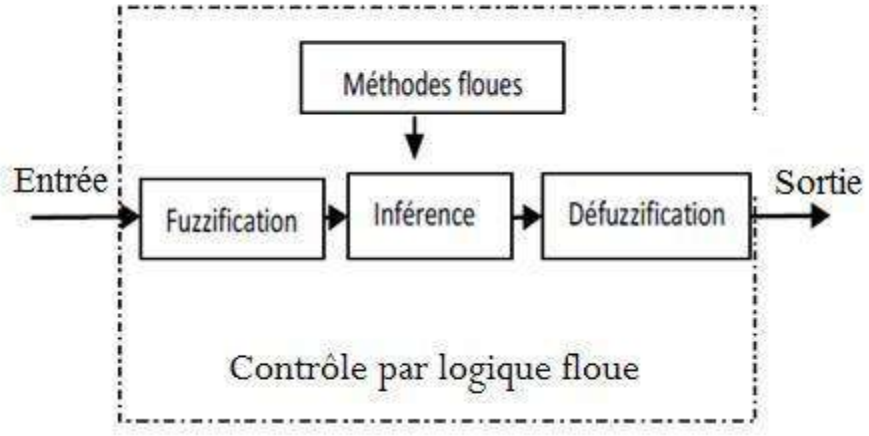


Figure 4.11 Le principe de la commande a Logique Floue.

IV.9.1 La Fuzzification :

Cette partie transforme les entrées numériques en grandeurs floues. Les entrées sont transformées en des variables linguistiques décrites par des fonctions d'appartenances. Ces fonctions peuvent avoir plusieurs formes : triangulaire, trapézoïdale, d'une cloche ou d'autres. Notre contrôleur flou utilise des fonctions d'appartenance trapézoïdale et triangulaire.

Les variables d'entrée et de sortie seront transformées en utilisant les variables linguistiques suivantes :

NG : Négatif Grand,

NP : Négatif Petit,

Z : Zéro,

PP : Positif Petit,

PG : Positif Grand,

**La première entrée du contrôleur floue dPreprésente la pente de la courbe caractéristique P- V :

$$\mathrm{dP} = \mathrm{Pph(k+1)} - \mathrm{Pph(k)}$$

Où Pph et Vph sont respectivement : la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

**La deuxième entrée dP est donnée par :

$$\mathrm{dP} = \mathrm{Vph(k+1)} - \mathrm{Vph(k}$$

**Le paramètre de sortie dD représente la variation du rapport cyclique.

Le schéma de notre régulateur sous Matlab est donné par la figure (IV.2).

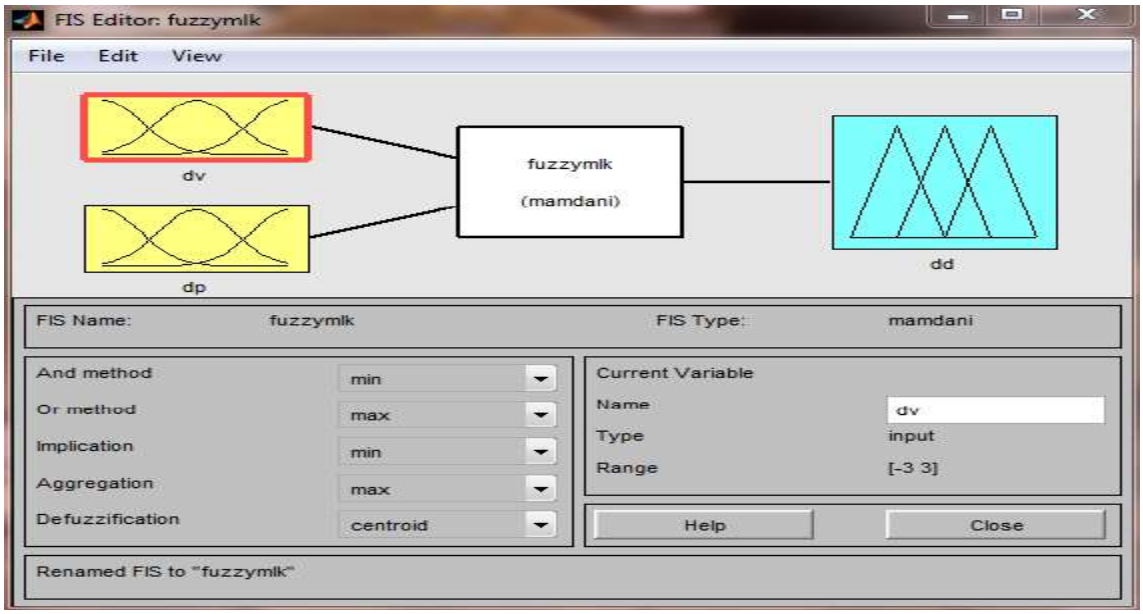
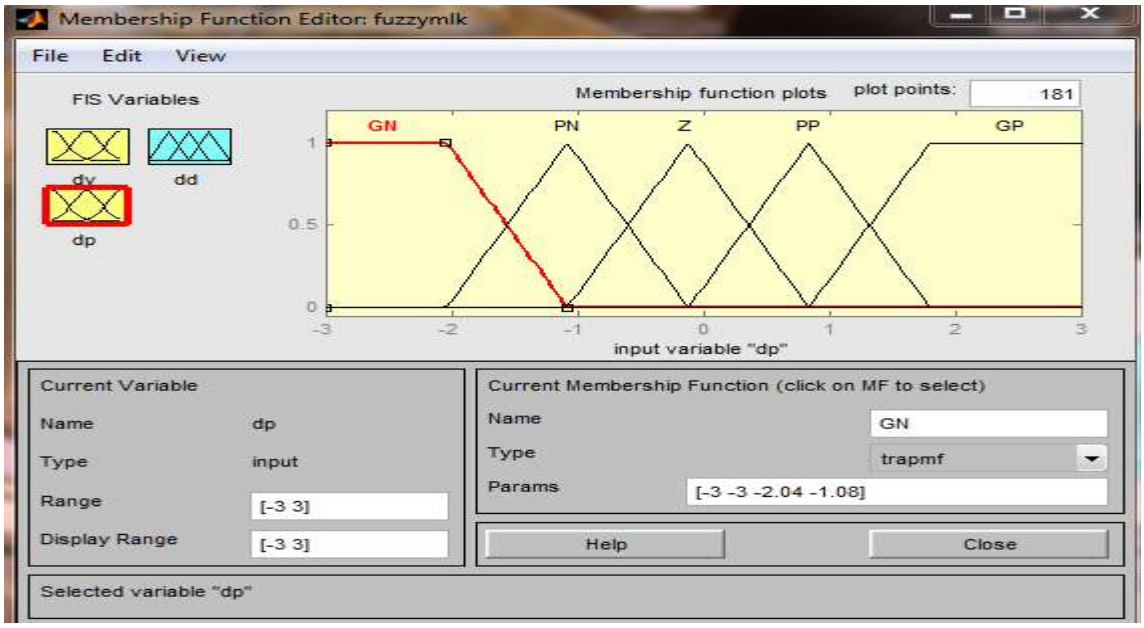


Figure 4.12 : Régulateur flou adopté.

Les figures (4.13) et (4.14) montrent les fonctions d'appartenance des différentes variables.

a)



b)

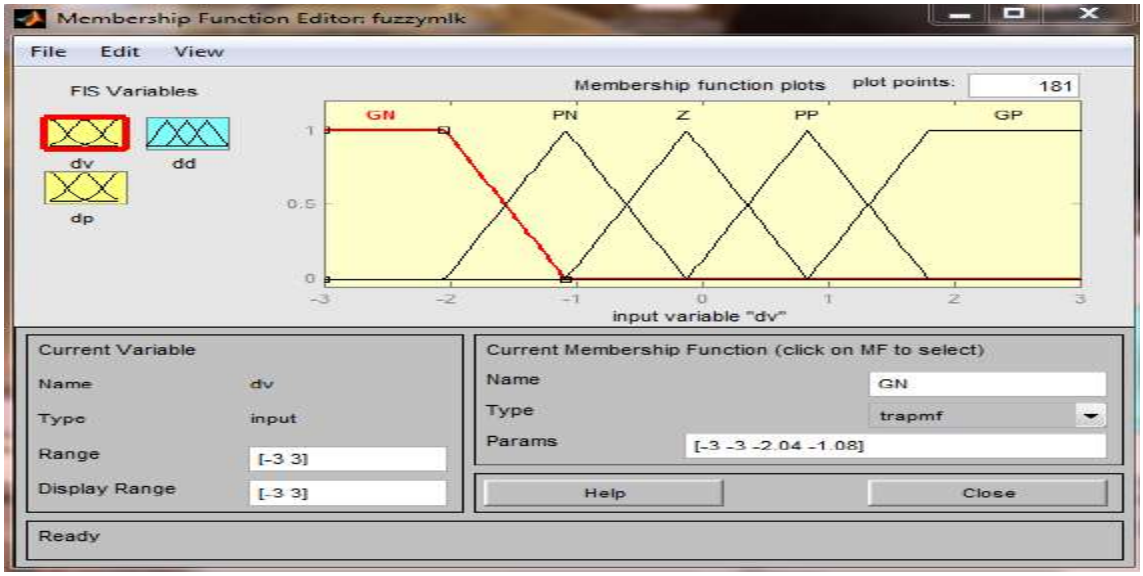


Figure 4.13 : Fonctions d'appartenance des variables d'entrées : (a) dP et (b) dV.

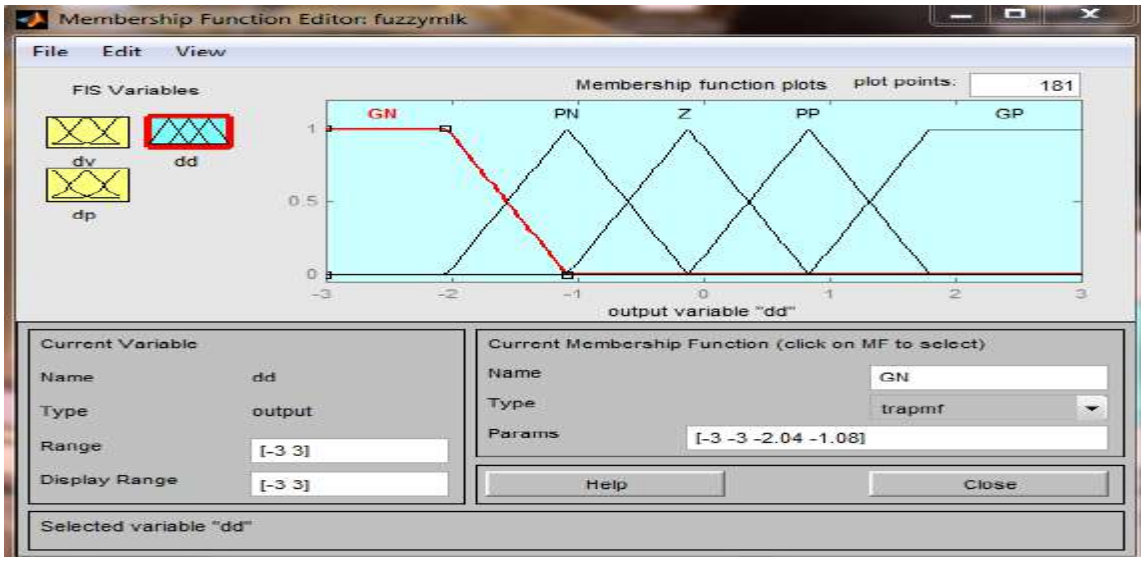


Figure 4.14. Fonctions d'appartenance de la variable de sortie dD.

IV.9.2 Méthode d'inférence floue :

C'est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie.

L'inférence donne une relation entre les variables d'entrée et de sortie d'un contrôleur flou en forme linguistique. Il existe plusieurs méthodes d'inférence : MAX-MIN, MAX-PROD, SOMME-PROD et d'autres. Chaque méthode admet ses propres opérateurs. Le bloc inférence doit contenir une base de règles .Cette base est écrite par l'utilisateur.

Chaque règle à la forme suivante :

Si (Condition), ALORS (Conclusion)

La méthode utilisée par notre contrôleur flou est la méthode MAX-MIN. Dans cette méthode les opérateurs ET, OU et ALORS, sont représentés par les fonctions MIN et MAX :

Au niveau de la condition : ET → MIN et OU → MAX

Au niveau de la conclusion : OU → MAX et ALORS → MIN

La base de règles de notre contrôleur flou à la forme suivante :

Si (« ΔV Condition 1 » ET « ΔP Condition 2 ») ALORS « Conclusion 1» OU…….

Si («ΔV Condition 1 » ET « ΔP Condition 3 ») ALORS « Conclusion 2» OU …….

La figure (IV.5) présente deux pentes successives ΔV (k) et ΔV (k-1). Nous remarquons que lorsque : ΔP (k) >0 et ΔP(k) <0, nous allons augmenter la tension et nous sommes en un point proche du PPM. Donc les variations de la tension dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et le PPM. Lorsque nous nous approchons de ce point, il faut affiner l'incrémentation de la tension afin d'atteindre l'état le plus stable. Notons que la variation de la tension est représentée par une variation du rapport cyclique dans le mêmes sens. Après avoir étudié tous les cas nous avons adopté la base de règles du tableau (IV.1).

dv \ dp	NG	NP	Z	PP	PG
NG	Z	Z	PG	PG	PG
NP	Z	Z	PP	PP	PP
Z	PP	Z	Z	Z	NP
PP	NP	NP	NP	Z	Z
PG	NG	NG	NG	Z	Z

Tableau 4.2. : Base de règles.

Le tableau (IV.1) [56] montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les ensembles flous de ΔP, et (ΔV) et le changement du rapport cyclique (dD) du convertisseur.

La figure (IV.6) montre la base de règles implémentée sous Matlab en utilisant le toolbox «Fuzzy Logic».

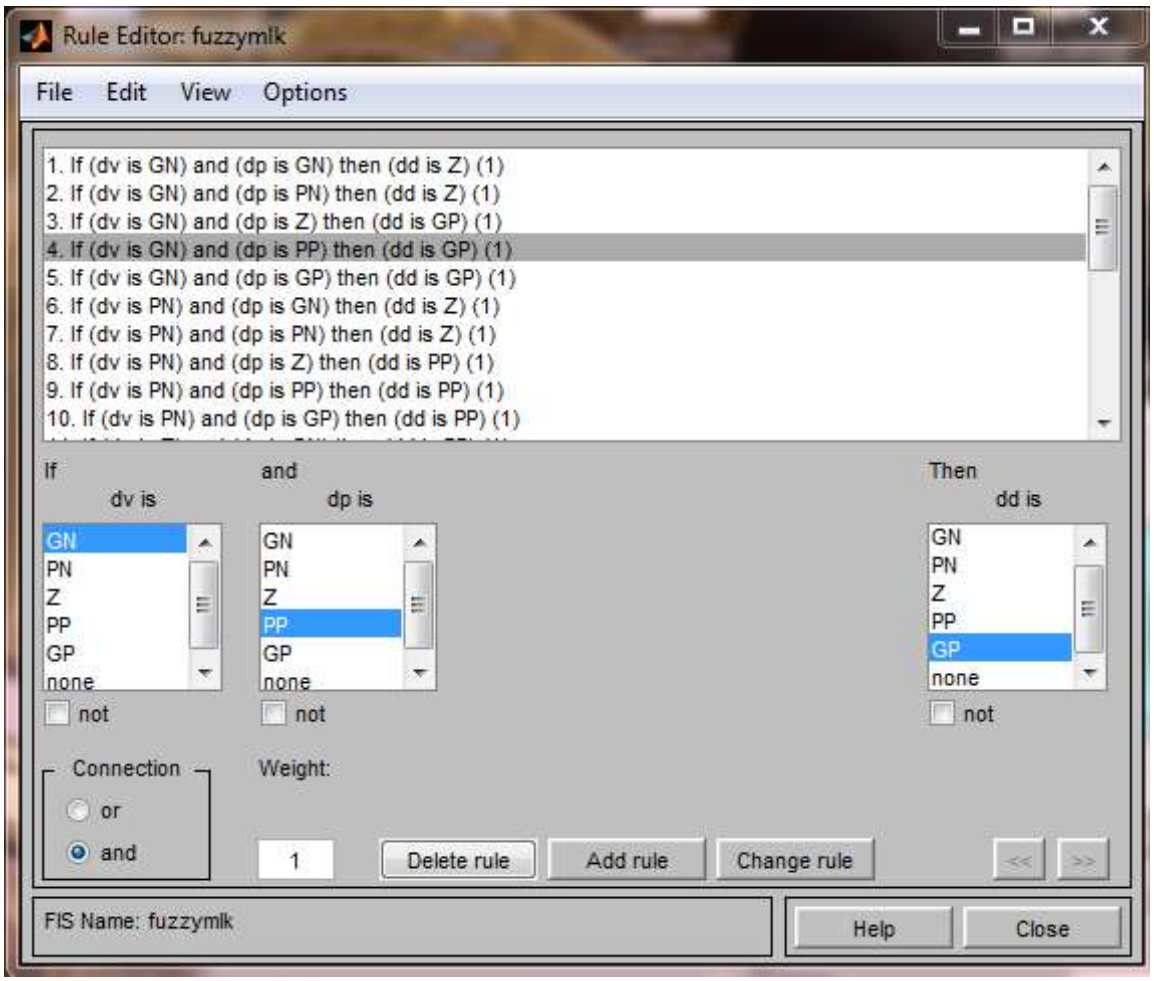


Figure 4.15 : Base de règles sous Matlab.

IV.9.3 La défuzzification :

Dans ce bloc, le résultat flou fourni par l'inférence de la sortie dD est converti en valeur réelle ou en grandeur numérique. Nous distinguons plusieurs méthodes de défuzzification :

**la méthode du maximum.

**la méthode de la moyenne pondérée.

**la méthode simplifiée du centroïde.

**la méthode du centroïde et d'autres.

La méthode utilisée par notre contrôleur flou est la méthode du centroïde. Cette méthode va donc convertir le résultat flou de la variable de sortie dD en des variations du rapport cyclique qui seront acceptables par le convertisseur. La méthode du centroïde calcule le centre de gravité de la surface floue fournie par le bloc d'inférence.

Exemple de fonctionnement du contrôleur flou sous Matlab :

Si dP = 0.5 et dV = 0.5 alors dD = 0.5

La figure (IV.7) présente le résultat fourni par le bloc d'inférence sous Matlab. Cette figure montre le résultat numérique.

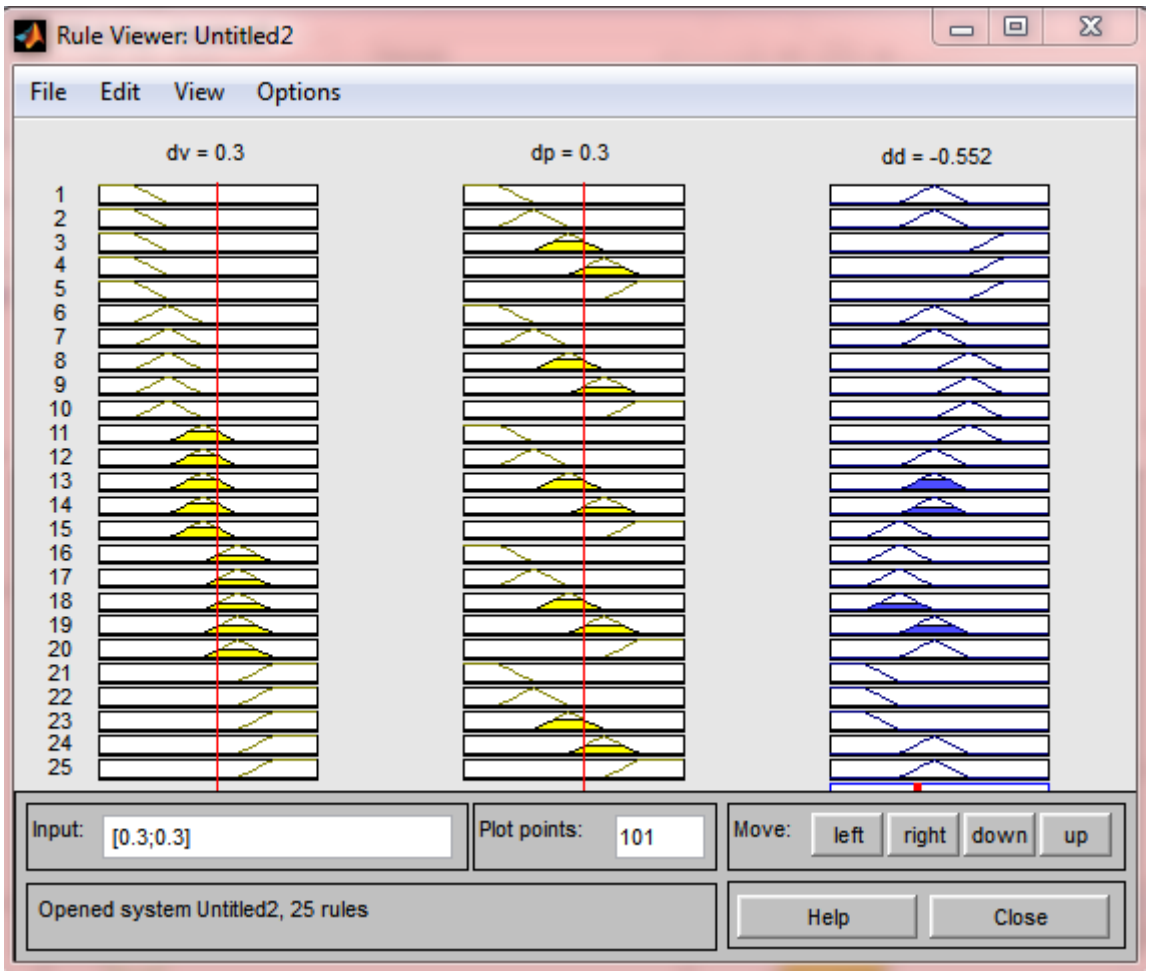


Figure 4.16 : Résultat numérique fourni par le bloc d'inférence pou dP = 0.3 et dV= 0.3 et dD=-0.552

IV.9.4 Structure et simulation de la commande MPPT numérique basé sur la logique floue

IV.9..41 Simulation de la méthode MPPT flou :

Dans cette section, on présente les différentes simulations d'un système photovoltaïque contrôlé par une commande MPPT floue. Le système comprend un générateur photovoltaïque de type BP MSX 120, un convertisseur statique continu survolteur, la commande MPPT par le contrôleur floue et enfin une batterie électrochimique comme unité de stockage.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous l'environnement MATLAB/Simulink.

La figure (IV.9) montre l'interface de masque de ce modèle de MPPT flou. Le paramètre d'entrée pour ce modèle est le courant photovoltaïque. La variation du courant du MPPT flou varie la tension photovoltaïque de rendement.

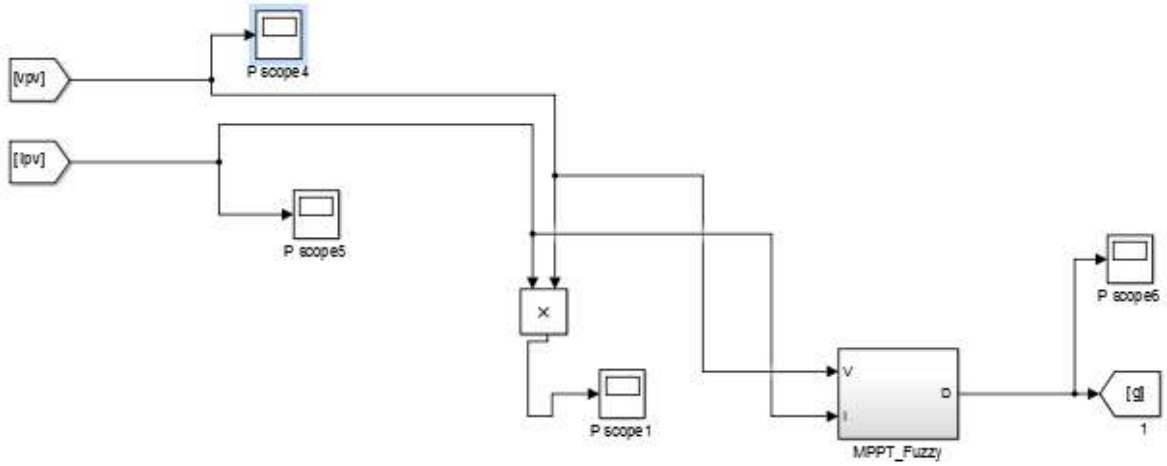
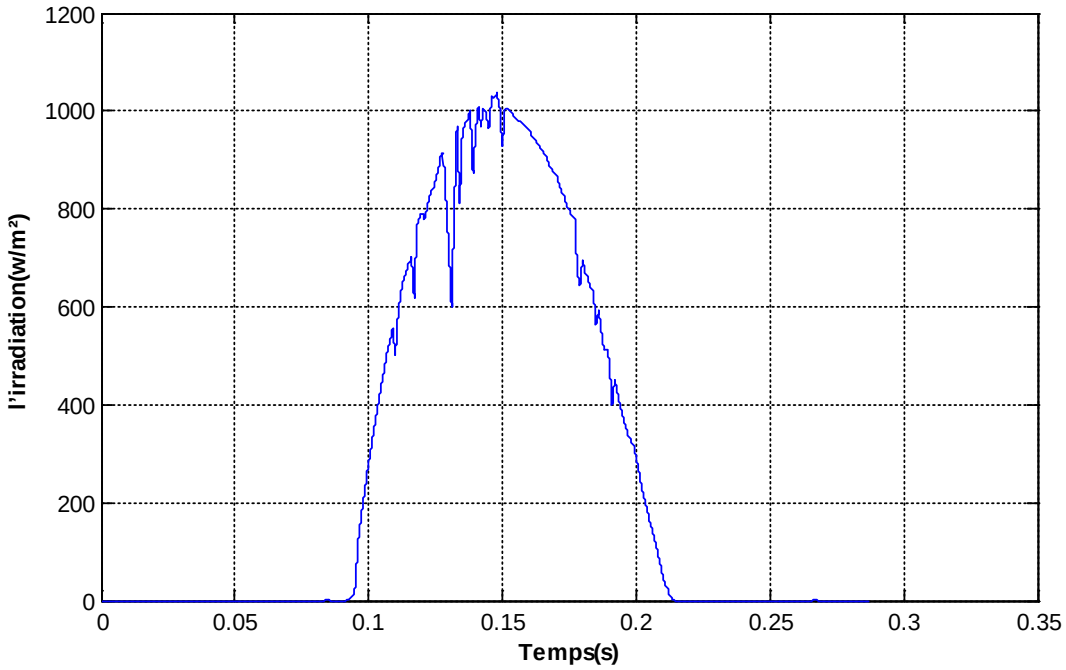


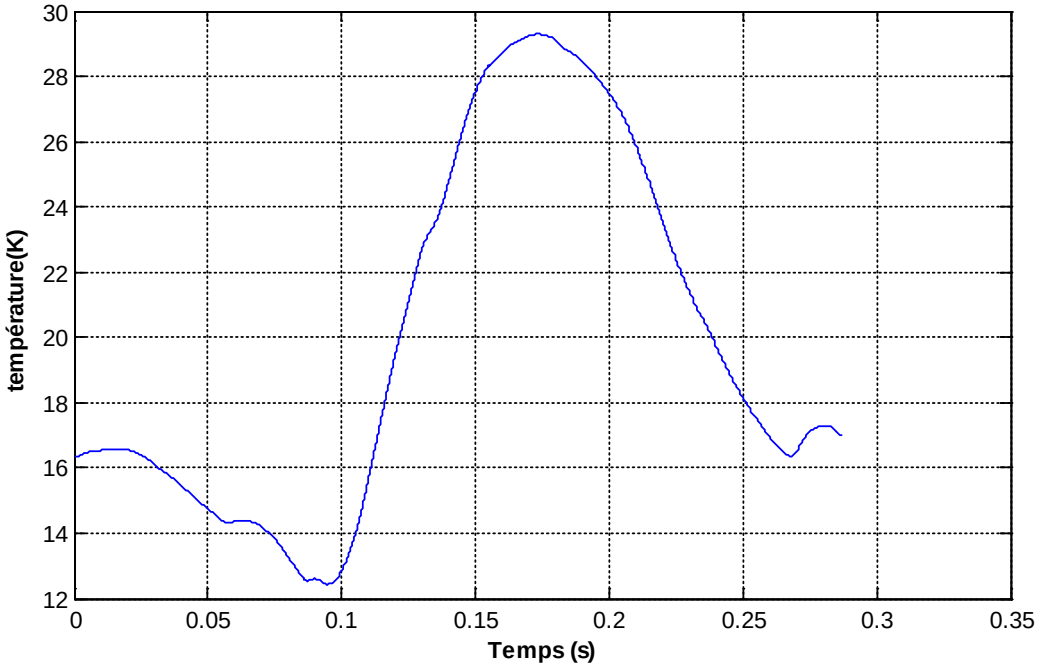
Figure 4.17 : Modèle de sous-système de Simulink MPPT flou.

IV.10. simulation du système photovoltaïque adapté par les d'eaux commandes MPPT (P&O,logique floue) :

Dans cette simulation, nous nous un tests (avec d'irradiation, et un température variable).



-a- l'irradiation G



-b- température T

Figure 4.18.variation d'irradiation et température

IV.10.1 simulation de l'algorithme P&O :

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et observation » représentent par les figures suivant:

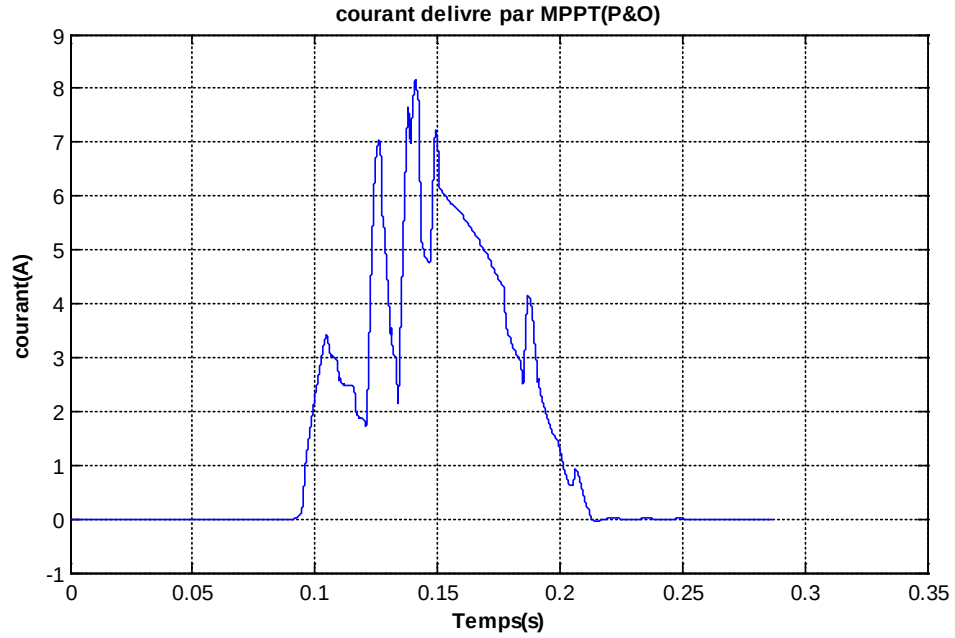


Figure 4.19 : *Résultats de simulation du courant de module par MPPT (P&O).*

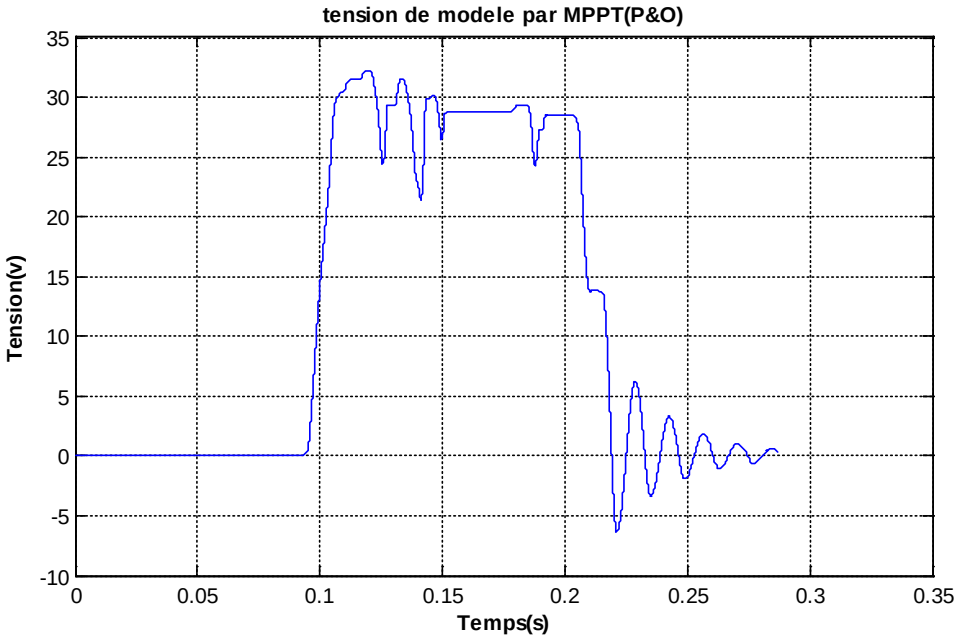


Figure 4.20 : *Résultats de simulation de la tension de modul par MPPT (P&O).*

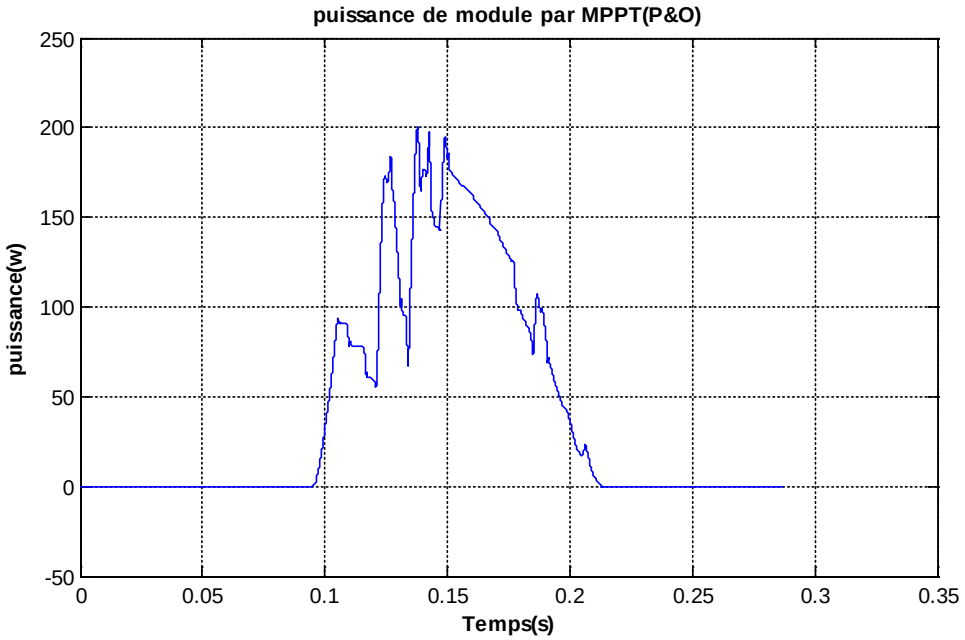


Figure 4.21 : Résultats de simulation de la puissance de module par MPPT (P&O).

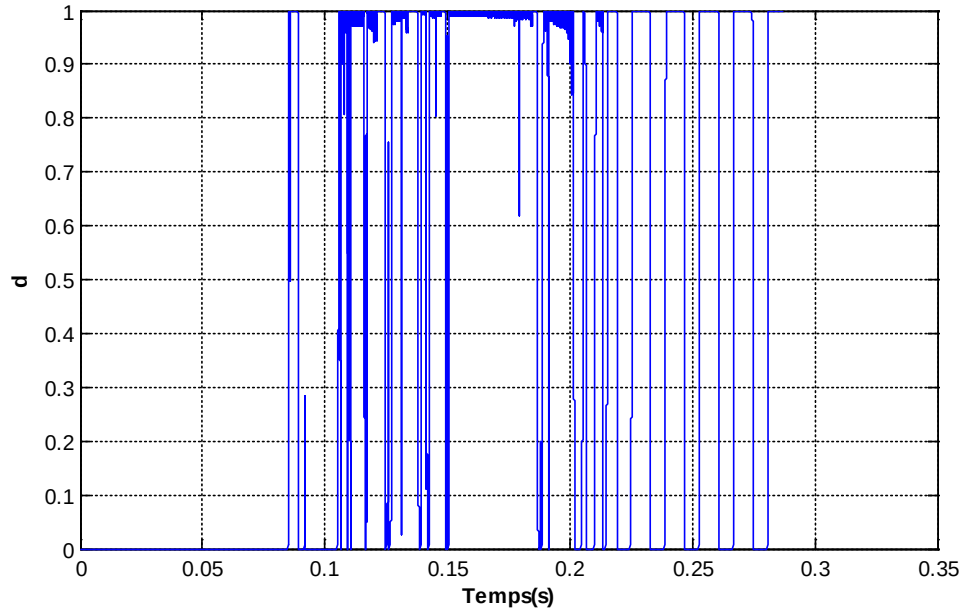
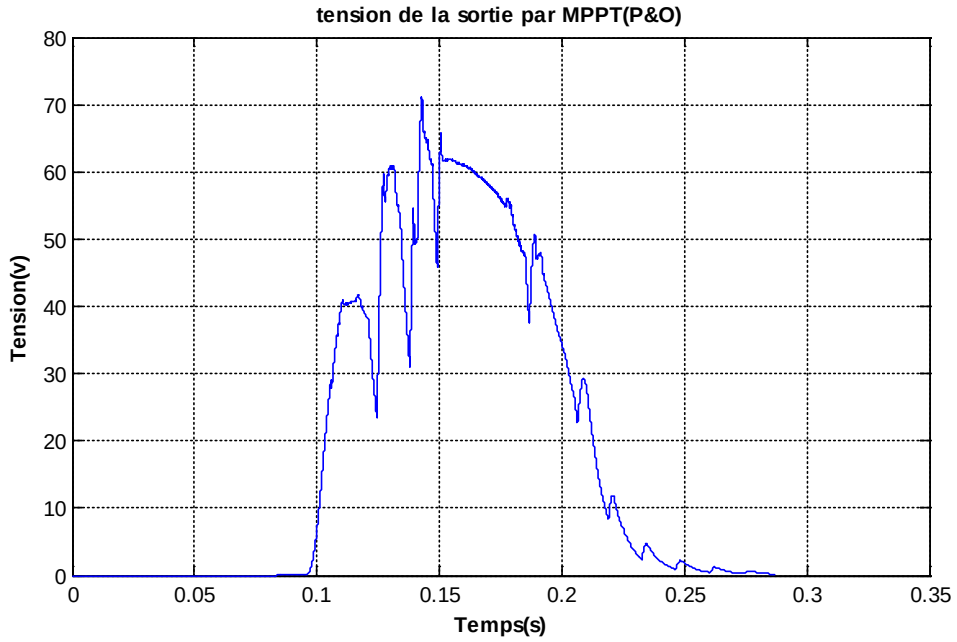


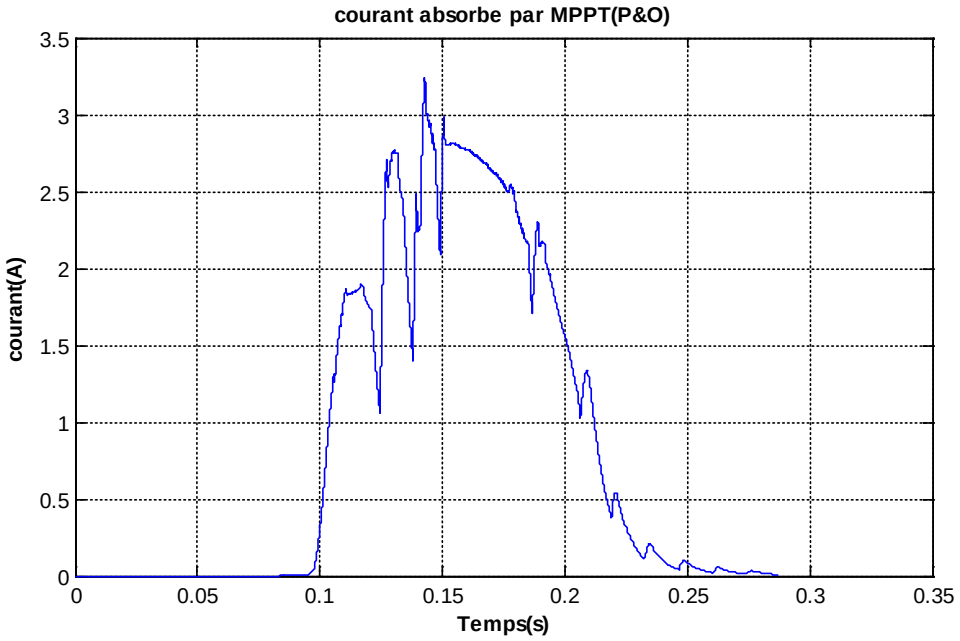
Figure 4.22 : Résultats de simulation du rapport de cyclique.

IV.10.2 Simulation d'hacheur survolteur :

La simulation du convertisseur survolteur (boost) de cotée charge représentent la tension, courant et puissance de sortie (G et T variable), Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

Les résultats représentés par les figures suivant :





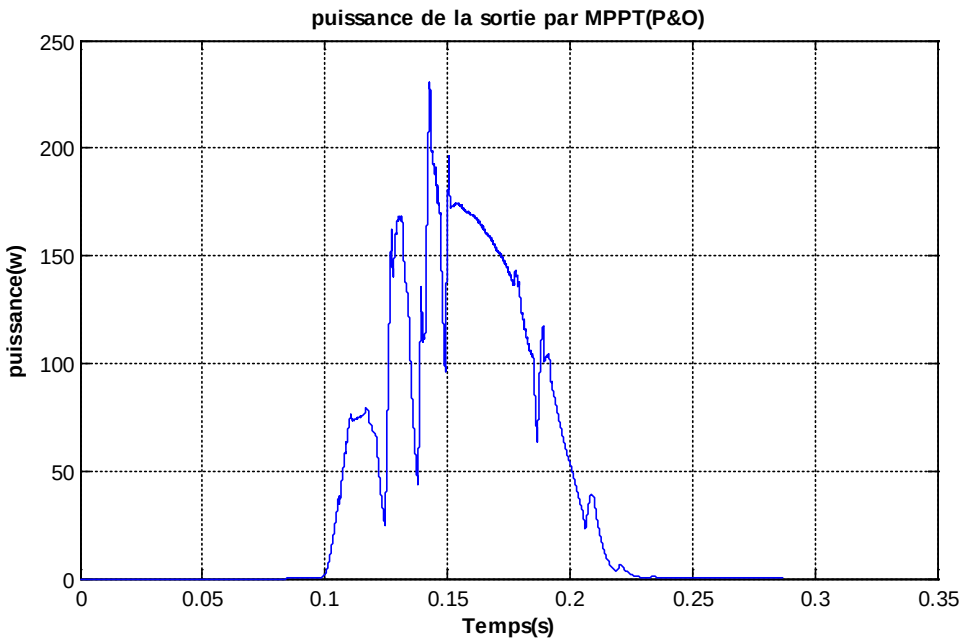


Figure 4.23: résultats des simulations de la tension, courant et puissance de la charge Par MPPT (P&O).

.

IV.10.3 Résultats de simulation de la commande MPPT floue :

Les figures (**4.23**), (**4.24**) et (**4.25)** représentent respectivement les caractéristiques : P(t), V(t) et I(t) obtenues sous un éclairement **E** et une température **T « variable ».**

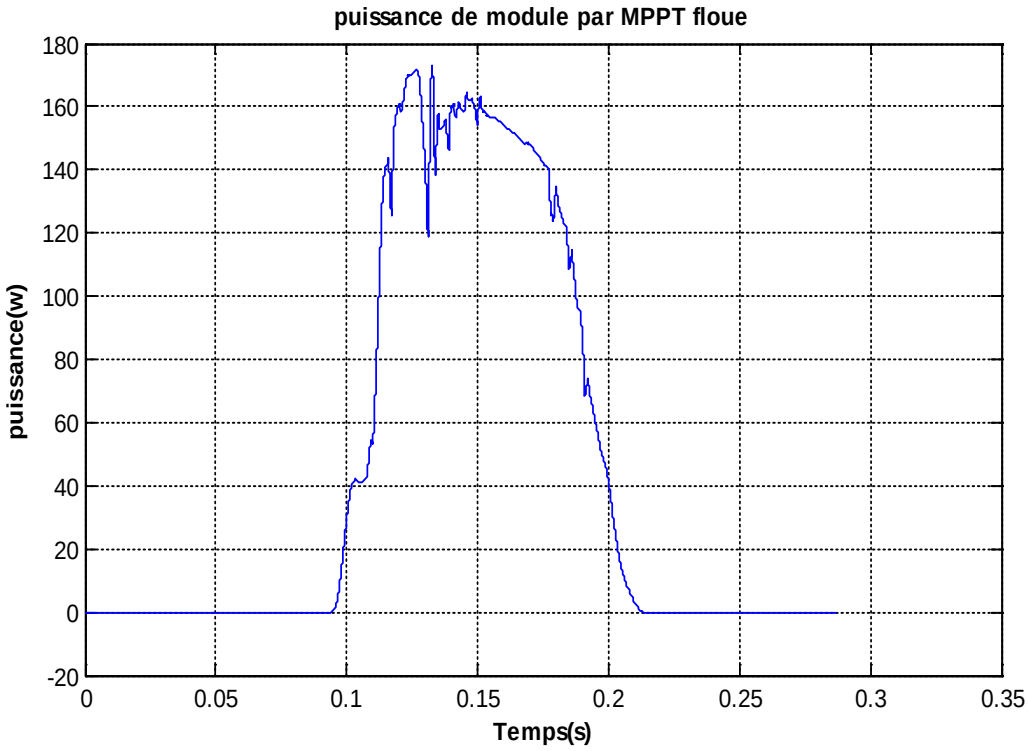


Figure 4.24 *Puissance de sortie P(t) du GPV.*

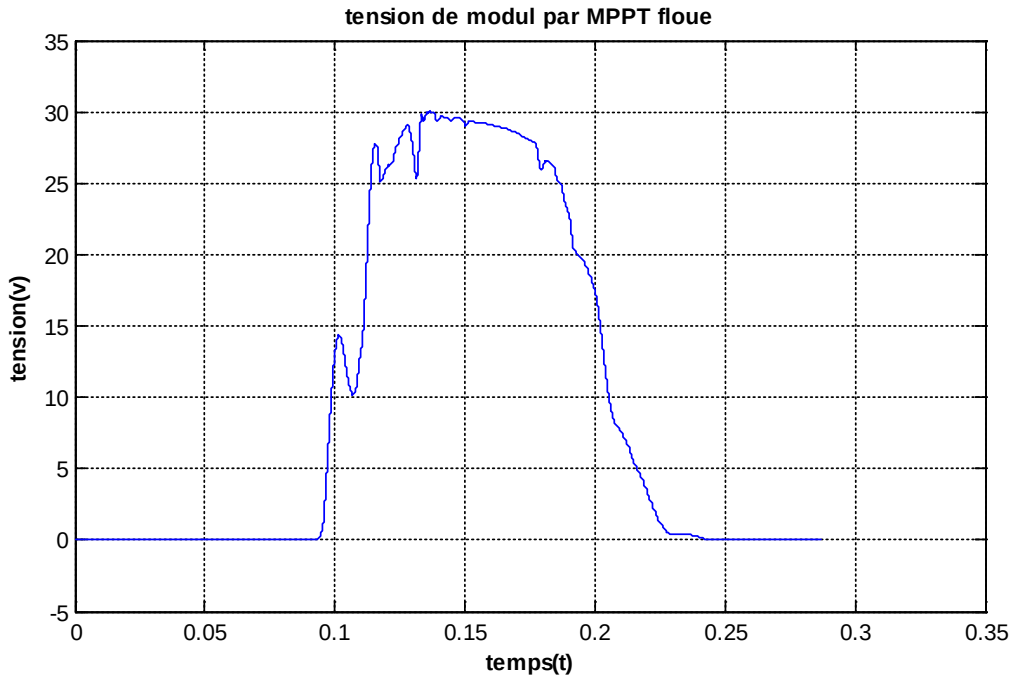


Figure 4.25 *Tension de sortie V(t) du GPV.*

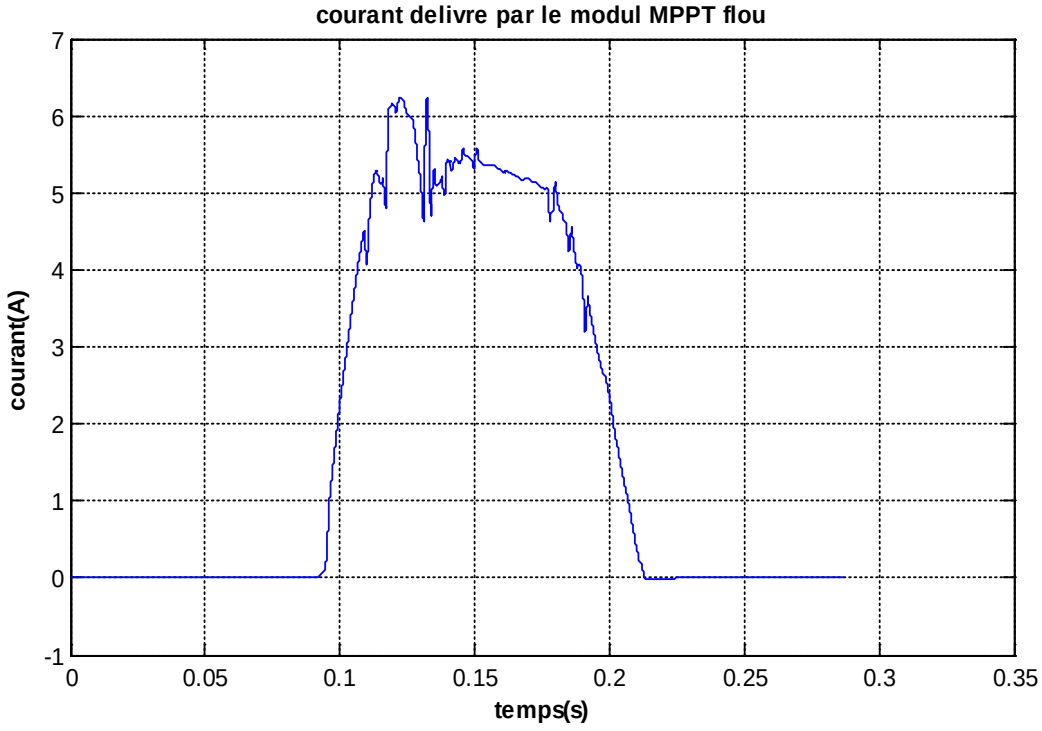


Figure 4.26 *Courant de sortie I(t) du GPV.*

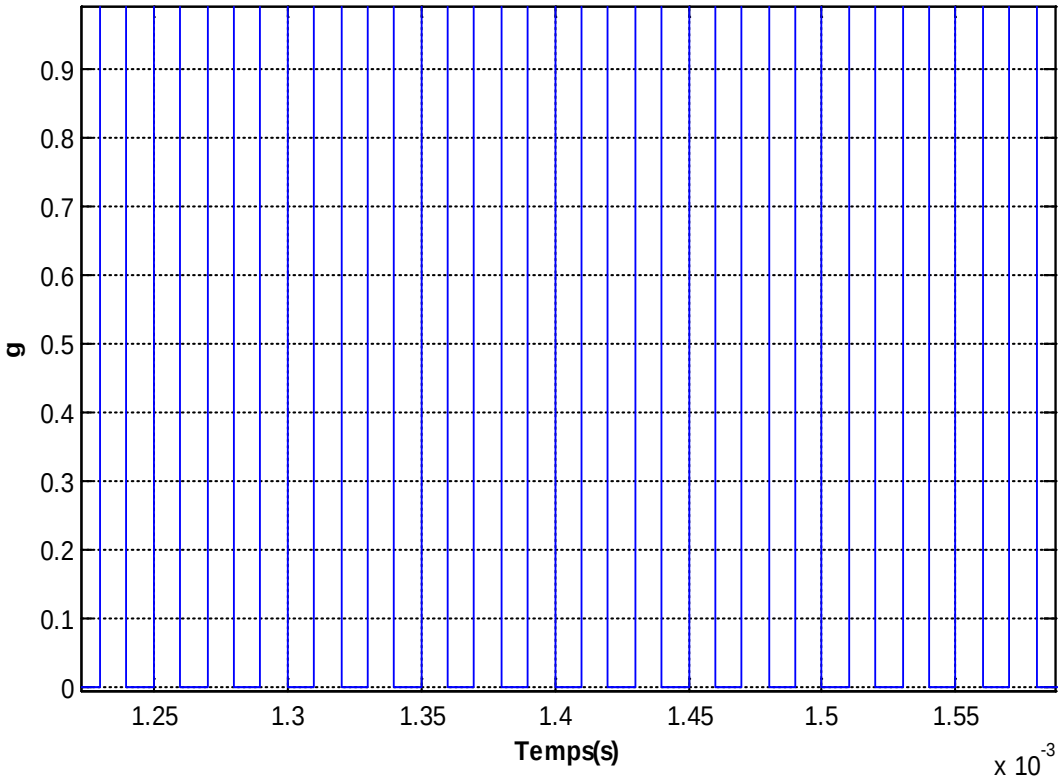
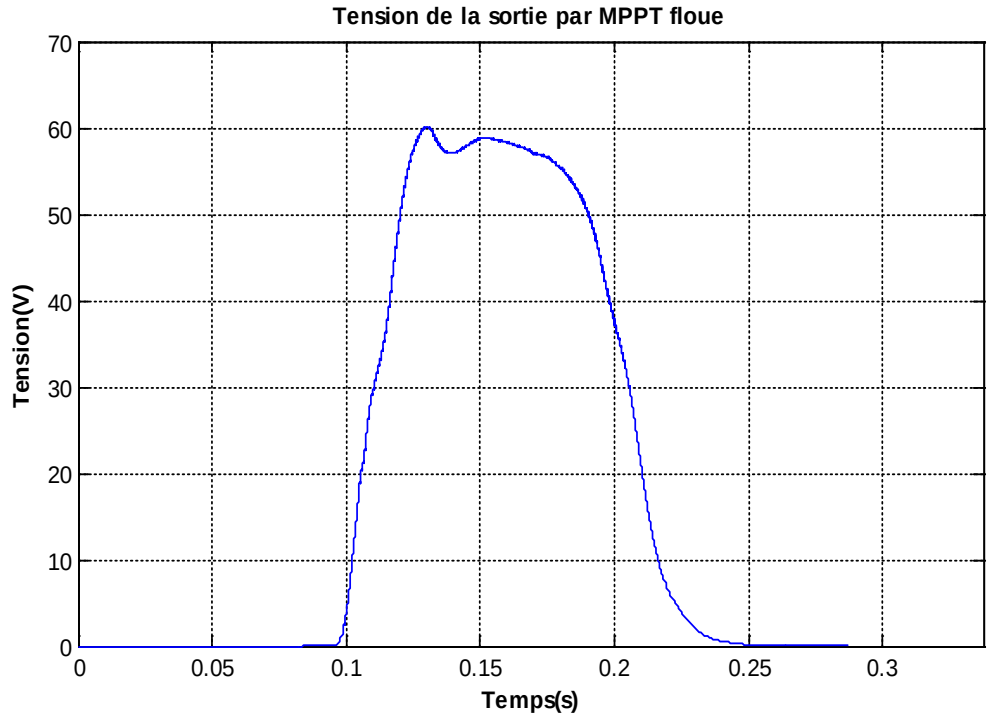
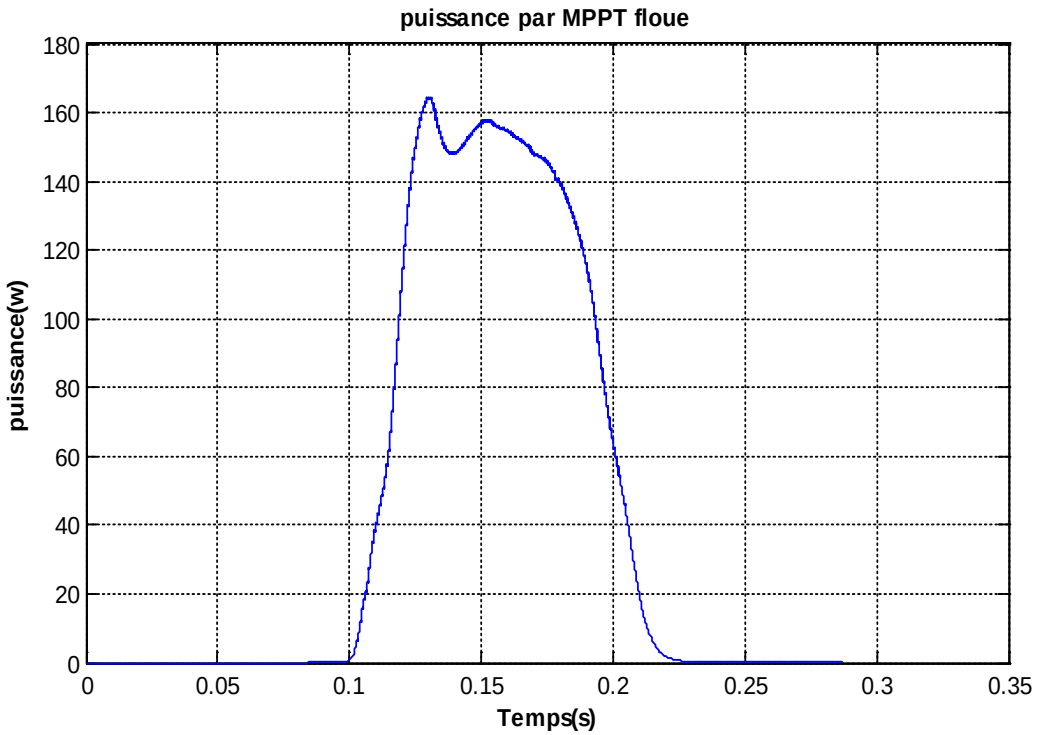


Figure 4.27: Résultats de simulation du rapport de cyclique.

Les figures suivantes représentent respectivement les caractéristiques V(t) ,P(t) et I(t) de la charge par MPPT floue.





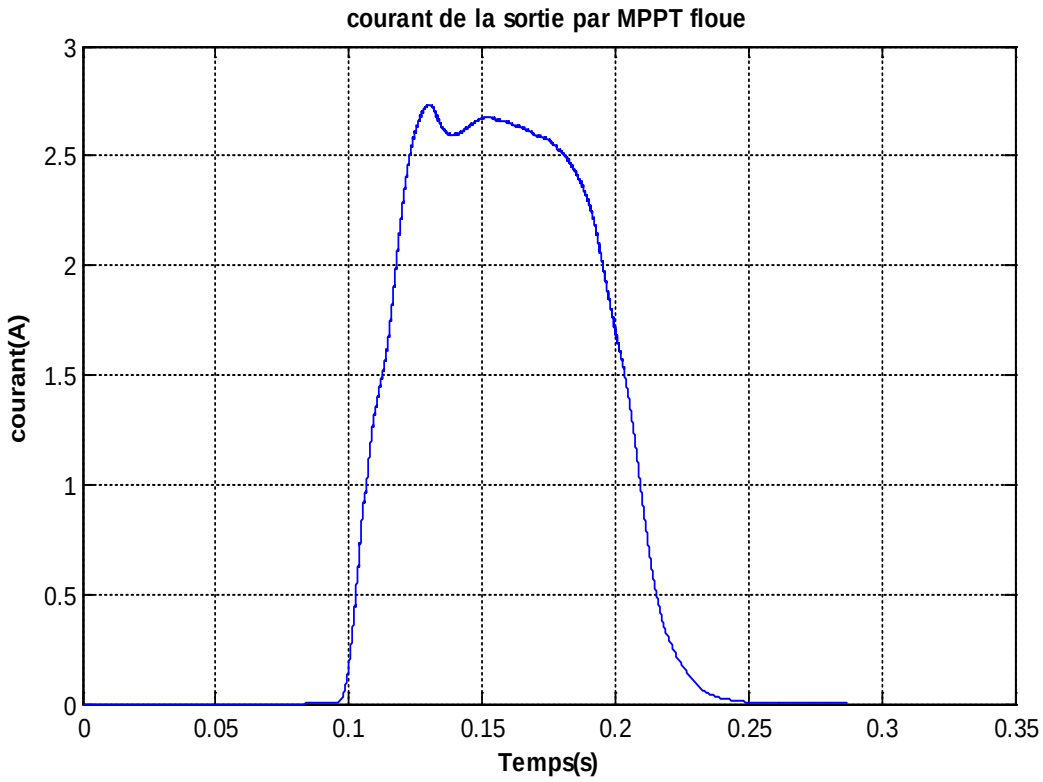


Figure 4.28 : résultats des simulations de la tension, courant et puissance de la charge Par MPPT floue.

IV.11.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système de captage photovoltaïque adapté par une commande numérique intelligente (commande MPPT P&O et commande MPPT floue) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque et permettant ainsi d'obtenir un bon rendement.

Les différentes règles que doivent suivre le système et un organigramme ont été développées pour la mettre en œuvre de la simulation. Cet organigramme permettra aussi d'implanter cet algorithme MPPT P&O et algorithme MPPT floue.

Les résultats des simulations de l'algorithme MPPT flou donne des résultats meilleurs .

Les différentes simulations montrent que le contrôleur MPPT flou permet au système de bien réagir afin de ne pas perdre le point de fonctionnement optimal où la puissance transitée vers la charge est maximale. L'asservissement présente une bonne performance : précision, rapidité et stabilité ainsi qu'une bonne faculté de poursuite.

Conclusion générale :

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur la logique floue

Et on a vu dans la deuxième étude, section nous introduisons d'abord d'une manière très succincte la structure générale ainsi que différentes types de modèles flous. Ensuite nous nous focalisons en particulier sur une description du modèle flou de type Takagi-Sugeno. Enfin nous abordons le but et les différentes approches pour l'identification de modèles flous en mettant l'accent sur l'approche de construction de modèles à partir de données.

On a étudié, dans un troisième temps , on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi que le générateur photovoltaïque et leurs performances.

Finalement, Puis, on a représenté la structure de la commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

En suite, nous avons rappelé le principe de algorithmes MPPT, Logique floue, Enfin,nous avons terminé par une simulation des différents algorithmes.
On peut dire d'après les résultats de la simulation obtenus que :

- ✓ Les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module PV.
- ✓ Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles.
- ✓ Parmi tous ces algorithmes, le 'P&O' sont largement utilisés, mais la commande basée sur la logique floue montre un bon comportement et des meilleures performances.
- ✓ La commande MPPT soit classique (P&O) ,Floue permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude des résultats de simulation a permis de

constater que la commande MPPT Floue conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse , de l'erreur en régime permanent et pas d'ondulation dans la puissance générée par le panneau photovoltaïque).

La commande MPPT soit classique P&O, ou Floue permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT Floue conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de l'erreur en régime permanent).

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques autonomes et les commandes MPPT classiques et floue.

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à base de microcontrôleur ou DSP, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

Bibliographies

[1] A. PAGES, L'utilisation des énergies renouvelables pour l'électrification rurale décentralisée des pays en développement, Octobre (2000).

[2] S-H. Wei,S.Chen and X.G .Gong,Phys. Rev B 75,205209(2007).

[3] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, 8(3) :338 – 353.[cited at p. 2].

[4] Leekwijck, W. V. and Kerre, E. E. (1999). Defuzzification : criteria and classification. Fuzzy Sets and Systems, 108(2) :159 – 178. [cited at p.9].

[5].Madau D., D. F. (1996). Influence value defuzzification method. Fuzzy Systems, Proceedings of the Fifth IEEE International Conference, 3 :1819 – 1824. [cited at p. 11].

[6] KOSKO, B., Fuzzy systems as universal approximators , IEEE Trans.Computers, vol.43, pp.1329-1333, 1994.

[7] WANG, L.X., Adaptive Fuzzy Systems and Control, Design and Stability Analysis. Prentice Hall, New Jersey, 1994.

[8] ZENG, X., SINGH, M., Approximation theory of fuzzy systems – MIMO case, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol.3, n2, pp.219-235, 1995.

[9] TAKAGI, T., SUGENO, M., Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol.15, n1, pp.116-132, 1985.

[10] LIN, C., Neural Fuzzy Control Systems with Structure and Parameter Learning. World Scientific, Singapore, 1994.

[11] BABUŠKA, R., Fuzzy Modeling for Control. Kluwer Academic Publishers, Mass., USA, 1998.

[12] ZADEH, L., Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol.1, pp.28-44, 1973.

[13] MAMDANI, E., Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems, Fuzzy Sets and Systems, vol.26, pp.1182-1191, 1977.

[14] PEDRYCZ, W., An identification algorithm in fuzzy relational systems, Fuzzy Sets and Systems, vol.13, pp.153-167, 1984.

[15] YI, S., CHUNG, M., Identification of fuzzy relational model and its application to control, Fuzzy Sets and Systems, vol.59, pp.25-33, 1993.

[16] DUBOIS, D., PRADE, H., Fuzzy Sets and Systems – Theory and Applications. Academic Press, New York, 1980.

[1]BOUCHON-MEUNIER, B., La logique floue et ses applications, Addison- Wesley, Paris, 1995.

[18] YAGER, R.R., FILEV, D.P., Essentials of fuzzy modeling and control, John Wiley & Sons, New York, 1994.

[19] ZADEH, L., Fuzzy sets, Inf. Control, vol.8, pp.338-353, 1965.

[20] DRIANKOV, D., HELLENDOORN, H., REINFRANK, M., An Introduction to Fuzzy Control, Springer, Berlin, 1993.

[21] GALICHET, S., Contrôle flou : de l'interpolation numérique au codage de l'expertise. Habilitation à Diriger des Recherches, Laboratoire LAMII, Université de Savoie, Annecy, France, 2001.

[22] FOULLOY, L., GALICHET, S., Typology of fuzzy controllers. In: NGUYEN, H.T, SUGENO, M., TONG, R., YAGER, R., (Eds.), Theoretical aspects of fuzzy control, John Wiley & Sons, pp.65-90, 1995.

[23] TRAORE, A., Logique floue et Contrôle Supervisé des Procédés Biologiques de Dépollution. Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier II, France, 2003.

[24] KLIR, G., YUAN, B., Fuzzy sets and fuzzy logic; theory and applications. Prentice Hall, 1995.

[25] LEE, C., Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller – part I, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol.20, n2, pp.404-418, 1990.

[26] LEE, C., Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller – part Ii, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol.20, n2, pp.419-435, 1990.

[27] DUBOIS, D., PRADE, H., Théorie des possibilités, Masson, 2ième édition, 1987.

[28] BOUCHON-MEUNIER, B., La logique floue, Collection Que sais-je, no 2702,Presses Universitaires de France, 1993.

[29] FANTUZZI, C., ROVATTI, R., On the approximation capabilities of the homogeneous Takagi-Sugeno model, in Proc. Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, New Orleans, USA, pp.1067-1072.

[30] ROVATTI, R., Takagi-Sugeno models as approximators in Sobolev norms: the SISO case, in Proc. Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, New Orleans, USA, pp.1060-1066.

[31] TANAKA, K., SUGENO, M., Stability analysis and design of fuzzy control systems, Fuzzy Sets and Systems, vol.45, n2, pp.135-156, 1992.

[32] WANG, H. O., TANAKA, K. and GRIFFIN, M., Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems by Takagi-Sugeno Fuzzy Model, Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems - FUZZ-IEEE'95,Yokohama, Japan, pp.531-538, 1995.

[33] ZHAO, J., GOREZ, R., WERTZ, V., Synthesis of Fuzzy Control Systems Based on Linear Takagi-Sugeno Fuzzy Models. In : MURRAY-SMITH, R., JOHANSEN, T.A., (Eds.), Multiple Model Approaches to Modelling and Control, Taylor & Francis, London, pp.307-336, 1997.

[34] BOYD, S., GHAOUI, L., FERON, E., Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory. SIAM, Philadelphia, 1994.

[35] BABUŠKA, R. FANTUZZI, C. KAYMAK, U., VERBRUGGEN H. B., Improved inference for Takagi-Sugeno models, In: Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, New Orleans, USA, vol.1, pp.701-706, 1996.

[36] ABONYI, J., Fuzzy Modeling Identification for Control. Birkhäuser, Boston, 2003.

[37] SALA, A., BABUŠKA, R., GUERRA, T.M., Perspectives of fuzzy systems and control, Fuzzy Sets and Systems, vol.156, pp.432-444, 2005.

[38] FILEV, D., Model based fuzzy control, In: Proc. Fourth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing EUFIT'96, Aachen, Germany,1996.

[39] TANAKA, K., IKEDA, T., WANG, H., Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: Quadratic stability, H∞ control theory and linear matrix inequalities, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol.4, n1, pp.1-13, 1996.

[40] (2010) http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw.

[41] BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avanccée de poursuite MPPT pour des application photovoltaique : étude compartive.," Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Departement d'éléctronique TS4/6338, 2007.

[42] S. NAOUAL, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur," Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotéchnique 2010.

[43] Uni. Kassel, 'Photovoltaic Systems Technology', Kassel, Germany, 2003, www.uni-Kassel.de/re.

[44] al. S. Zheng , "Study on Improving Output Current Waveform of Photovoltaic Grid-Connected system," IEEE, pp. 1-5, 2006.

[45] Djarallah, Mohamed, "CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES RESIDENTIELS COUPLES AU RESEAU ELECTRIQUE," UNIVERSITE DE BATNA Thèse de Doctorat en Science, 2008.

[46] al, J.E. Cotter , "'P-Type Versus n-Type Silicon Wafers: Prospects for High-Efficiency commercial silicon solar cells," IEEE, vol. 53, no. 8, pp. 1893-1901, 2006.

[47] N. Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières intèrdigités," Ecole Doctorale Thèse de Doctorat, 2005.

[48] F. HEROGUEL, "les cellules photovoltaïques," Ecole Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.

[49] B. Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome," Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008.

[50] A. C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ," Institit National de Science Appliquée de toulouse Thèse de doctorat.

[51] A.f Filipov , « Differential equation with discontinuous right-hand side» .Amer.Mat Soc .Trans62p: 199-231, 1960.

[52] V.I.Utkin,''sliding modes and their application in variable structure systems '',EditionMIR, URSS,1978.

[53] BENSACI-Wafa ,« Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT»,Mémoire de master en génie élictlique,universitékasdimerbah-ourgla

[54] F. Rakotomananandro. «Study of Photovoltaic System», thèse de Master. Graduate School of The Ohio State University, 2011.

[55] Villalva, M.G., Gazoli, J.R. and Filho, E.R.; « Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays, » Power Electronics Conference, IEEE 2009. COBEP '09. Brazilian, December 2009.

[56] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.