

## Mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire

Mohamed Salah Aït Cheikh<sup>1</sup>, Boubakeur Hadj Aïssa<sup>1</sup>,  
Ali Malek<sup>2</sup> et Mohamed Becherif<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque  
Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique  
Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger, Algérie

<sup>2</sup> Division Energie Solaire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies Renouvelables  
B.P. 62, Route de l'observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

<sup>3</sup> Laboratoire Systèmes et Transport, Université de Technologie de  
Belfort-Montbéliard, Rue Thierry Mieg, 90010 Belfort cedex, France

(reçu le 20 Mai 2010 – accepté le 25 Septembre 2010)

**Résumé** - *Le changement de la politique du monde vers une autre source d'énergie qui remplacerait les énergies fossiles 'pétrole et gaz' est une obligation qui est imposée par les derniers événements, tels que les changements climatiques, l'effet de serre, et l'instabilité des prix du pétrole. Les énergies renouvelables sont envisagées comme étant les meilleures solutions pour résoudre ces problèmes. Ce travail porte sur l'utilisation de l'énergie photovoltaïque dans les serres agricoles qui jouent un rôle important dans le domaine de l'agronomie. L'objectif de cette étude est de concevoir et d'implémenter des contrôleurs flous sur une carte électronique DSP dont le rôle est la gestion de l'énergie électrique et le contrôle du climat dans la serre.*

**Abstract** - *The change of the policy of the world towards another source of energy which replaces fossil energies 'oil and gas' is an obligation which was imposed by the last events such as climatic changes, global warming, and especially the instability of oil prices. Renewable energies are considered among the best solutions to solve these problems. The work presented concerns the use of photovoltaic energy in the agricultural greenhouses which play a very significant role in the field of agronomy. The objective of this study is to design and implement fuzzy controllers on an electronic DSP card whose role is the electric energy management and the greenhouse climate control.*

**Mots clés:** Energie photovoltaïque - Serres agricoles - Bilan d'énergie - Bilan de masse - Logique floue - Carte DSP.

### 1. INTRODUCTION ET MOTIVATION

Grâce à l'augmentation et l'instabilité énorme des marchés du pétrole et de ses dérivées, le monde ne cesse de chercher d'autres sources d'énergie pour assurer l'indépendance de leurs économies de la fluctuation des prix de pétrole. L'énergie photovoltaïque peut présenter des avantages indéniables, particulièrement pour sa propreté et son coût pas trop élevé. De plus celle-ci peut être utilisée dans diverses applications telles que l'agronomie et dans des sites isolés. Nous nous sommes donc intéressés à la commande de différentes variables intervenant dans les serres agricoles. Parmi celles-ci, nous pouvons citer la température et l'hygrométrie.

L'objectif de ce travail consiste donc à automatiser la commande de ces deux variables climatiques qui influent sur la production sous serre, à travers l'implémentation du programme sur une carte DSP, ainsi que réaliser un système de gestion d'énergie électrique de la serre à partir de l'énergie solaire (photovoltaïque).

Ce travail comprend la modélisation de la serre agricole (modèle réel), la simulation du modèle à partir de données réelles d'un site donné et l'établissement d'algorithmes de commande pour les variables de la serre ainsi que pour le système photovoltaïque. L'utilisation des données réelles est très importante car elle nous permettra de donner un sens à la simulation et de définir les différents gains et paramètres des régulateurs.

## 2. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Un générateur photovoltaïque est constitué principalement d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, d'un système de stockage d'énergie (batteries) et d'un convertisseur.

### 2.1 Modélisation du module

Le modèle de la cellule solaire, [1-2], considéré est celui décrit par la figure 1.

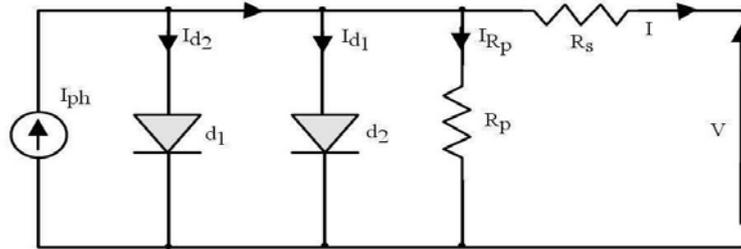


Fig. 1: Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Une cellule solaire comporte une résistance série  $R_s$  et une résistance en dérivation ou shunt  $R_p$ . Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule:

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

Le modèle mathématique de la caractéristique courant-tension, de la cellule décrite par la figure 1, est donné par:

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[ e^{\frac{q(V + I.R_s)}{n_1 k T}} - 1 \right] - I_{d2} \left[ e^{\frac{q(V + I.R_s)}{n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1)$$

$I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont les courants de saturation des diodes;  $n_1$  et  $n_2$  les facteurs de pureté de la diode;  $R_s$  et  $R_p$  sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle,  $T$  est la température absolue. L'équation contient également la charge élémentaire constante  $q$  ( $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) et la constante de Boltzmann

$k$  ( $k = 1.38 \times 10^{-22} \text{ J/K}$ ). Le photo-courant  $I_{ph \text{ max}}$  est atteint à une insolation maximum. Souvent, nous avons ( $I_{ph} = S \times I_{ph \text{ max}}$ ) avec  $S =$  pourcentage d'insolation.

Il est évident, de l'équation (1), que la caractéristique courant – tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance, vis-à-vis de la température, est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant  $I_{ph}$  et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par [2]:

$$I_{ph}(T) = I_{ph}|_{(T=298K)} \left[ 1 + (T - 298) \times 5.10^4 \right] \quad (2)$$

L'équation suivante montre le modèle mathématique d'un module photovoltaïque, avec  $N_r$  nombre des cellules photovoltaïques raccordés en série [2].

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[ e^{\frac{q(V+I.N_r.R_s)}{N_r.n_1.kT}} - 1 \right] - I_{d2} \left[ e^{\frac{q(V+I.N_r.R_s)}{N_r.n_2.kT}} - 1 \right] - \frac{V+I.N_r.R_s}{N_r.R_p} \quad (3)$$

### Influence de l'ensoleillement et de la température

Les figures suivantes présentent l'influence de l'ensoleillement et de la température sur les caractéristiques I-V et P-V des cellules photovoltaïques.

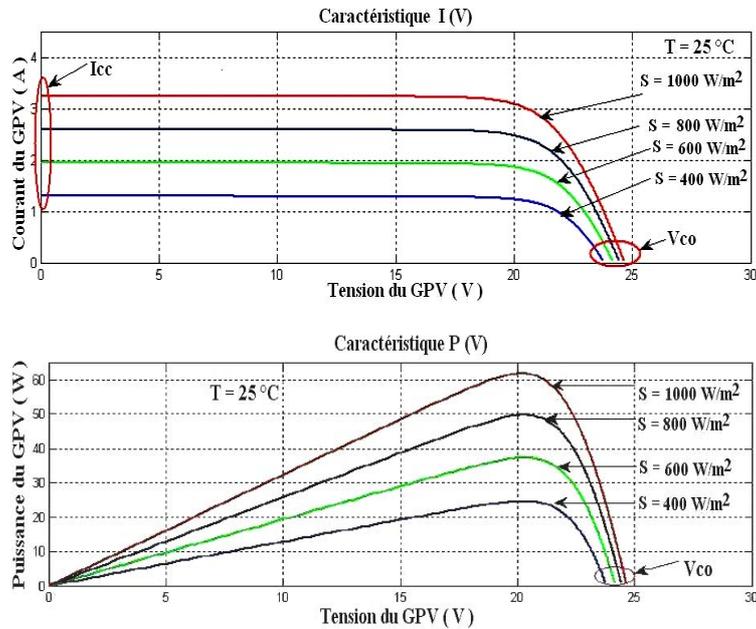


Fig. 2: Effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I-V et P-V

Nous observons que l'ensoleillement affecte beaucoup plus le courant  $I$  du générateur que la tension  $V$  et que la température, quant à elle, affecte beaucoup plus la tension que le courant.

Mais l'ensoleillement augmente la puissance, alors que la température l'abaisse.

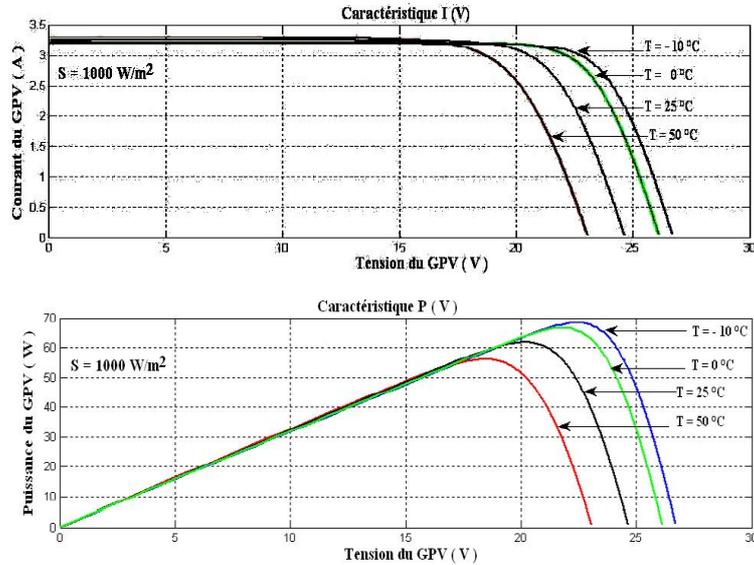


Fig. 3: Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

## 2.2 Stockage de l'énergie (Batterie)

Le système de stockage utilisé pour les systèmes photovoltaïques, est la batterie d'accumulateurs électrochimiques. Les réactions d'oxydoréduction qui gouvernent le fonctionnement d'une batterie sont réversibles, dans la mesure où celle-ci n'a pas été longtemps ni complètement déchargée ni trop surchargée. Un fonctionnement prolongé dans l'un ou l'autre de ces états aboutirait à la destruction définitive de la batterie.

L'élément de stockage d'énergie considéré dans notre système est la batterie plomb-acide. Celle-ci est décrite par le modèle suivant, (Fig. 4), [4].

Elle est représentée par quatre blocs:

- Bloc de capacités
- Bloc de tensions
- Bloc de l'état de charge (SOC)
- Bloc des pertes par le courant de gazage.

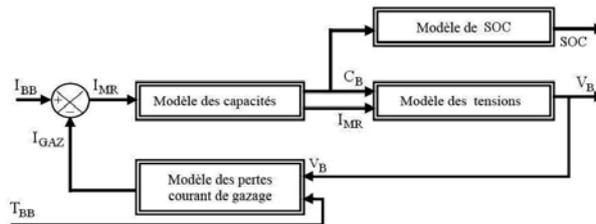


Fig. 4: Schéma bloc d'une batterie

$$I_{MR}(t) = I_{BB}(t) - I_{GAZ}(t) \quad (4)$$

$$C_B(t) = \int_{t=0}^t I_{MR}(t) dt + C_{B,i} \quad (5)$$

$$I_{GAZ}(t) = \frac{C_{10}}{100} \times I_{G0} \times e^{[C_V(V_{ele}(t) - 2.23 + C_T(T_{BB}(t) - 20)]} \quad (6)$$

$I_{BB}$  : Courant de la batterie (A);  $I_{GAZ}$  : Courant de gazage de la batterie (A);  $C_B(t)$  : Capacité de la batterie (Ah);  $C_{B,i}$  : Capacité initiale de la batterie (Ah);  $C_{10}$  : Capacité de la batterie, après dix heures de décharge (Ah),  $I_{G0}$  : Courant normalisé de gazéification (A),  $C_V$  : Coefficient de tension ( $V^{-1}$ ),  $V_{ele}$  : Tension d'un élément de batterie (V);  $C_T$  : Coefficient de température ( $K^{-1}$ );  $T_{BB}(t)$  : Température de la batterie (K).

En ce qui concerne l'état de la batterie, celui-ci est caractérisé par son état de charge, qui est décrit par le paramètre  $SOC(t)$  défini par l'expression suivante:

$$SOC(t) = \frac{C_B(t)}{C_{10}} \times 100\% \quad (7)$$

### 2.2.1 En charge: $I_{BB} > 0$

La tension de charge de la batterie est décrite par l'équation suivante:

$$V_B(t) = E_B(t) - R_{0,C} \times I_{MR}(t) \quad (8)$$

$$E_B(t) = E_{0,C} + A_C \cdot X(t) + \frac{C_C \cdot X(t)}{(D_C - X(t))^{EFC}} \quad (9)$$

$$X(t) = \frac{Q_{MAX,C}}{Q_{MAX}(I_{MR}(t))} \times C_B(t) \quad (10)$$

$$Q_{MAX}(I_{MR}(t)) = C_1 \times I_{MR}(t)^3 + C_2 \times I_{MR}(t)^2 + C_3 \times I_{MR}(t) + C_4 \quad (11)$$

Avec:  $R_{0,C}$  : Résistance interne de la batterie en charge;  $E_B(t)$  : Tension interne de la batterie;  $E_{0,C}$  : Limite de la tension interne de batterie pour un courant nul et batterie complètement déchargée;  $X(t)$  : Capacité maximum normalisée de charge/décharge;  $Q_{MAX,C}$  : Capacité maximum de charge; et où les paramètres  $A_C, C_C, D_C, EFC, C_1, C_2, C_3, C_4$  sont relatifs à la batterie.

### 2.2.2 En décharge: $I_{BB} < 0$

$$V_B(t) = E_B(t) - R_{0,D} \times I_{MR}(t) \quad (12)$$

$$E_B(t) = E_{0,D} + A_D \cdot X(t) + \frac{C_D \cdot X(t)}{(D_D - X(t))^{EFD}} \quad (13)$$

$$X(t) = \frac{Q_{MAX,D} (Q_{MAX,D} - C_B(t))}{Q_{MAX} (I_{MR}(t))} \quad (14)$$

$$Q_{MAX} (I_{MR}(t)) = D_1 \times I_{MR}(t)^3 + D_2 \times I_{MR}(t)^2 + D_3 \times I_{MR}(t) + D_4 \quad (15)$$

Avec:  $R_{0,D}$  : Résistance interne de la batterie en décharge;  $E_{0,D}$  : Limite de la tension interne de batterie pour un courant nul et batterie complètement chargée;  $Q_{MAX,D}$  : Capacité maximum de décharge; et où les paramètres  $A_D, C_D, D_D, E_{FD}, D_1, D_2, D_3, D_4$  sont relatifs à la batterie.

### 2.2.3 Chargeur de batterie

Les batteries doivent impérativement être protégées contre les surcharges et les décharges profondes, aussi est-il nécessaire d'y adjoindre un régulateur.

Sa fonction principale est de contrôler l'état de la batterie. Il autorise la charge complète de celle-ci en éliminant tout risque de surcharge et interrompant l'alimentation des charges destinataires si l'état de charge de la batterie devient inférieur au seuil de déclenchement de la sécurité anti décharge profonde. Prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie qui est le seul composant fragile du générateur photovoltaïque.

Parmi les types des charges des batteries, on peut citer le type série, qui sera utilisé dans notre application.

## 2.3 Convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

### 2.3.1 Hacheur parallèle (Boost) [5]

Le convertisseur Boost connu par le nom d'élevateur de tension - abaisseur de courant est représenté par la figure 6. Il est caractérisé par son rapport cyclique  $d$  compris entre 0 et 1, qui donne les temps d'ouverture et de fermeture du transistor  $S$ .

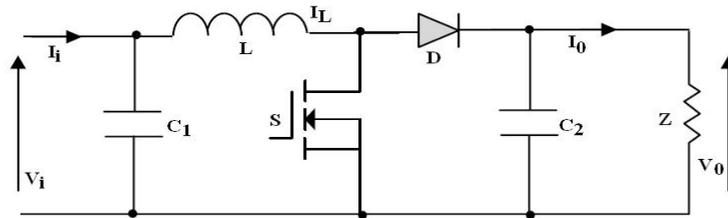


Fig. 5: Circuit électrique équivalent du convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement, (Fig. 6 et 7), donne:

$$0 < t < dT_s$$

$$\begin{cases} i_{C_1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C_2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = -i_0 \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - R_L i_L \end{cases} \quad (16)$$

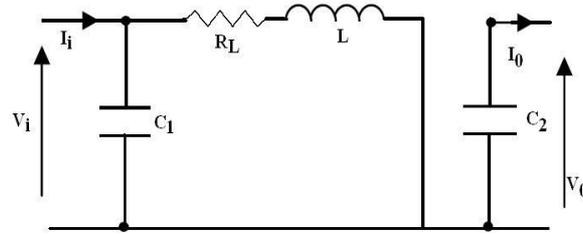


Fig. 6: Circuit équivalent du Boost, S fermé (a)

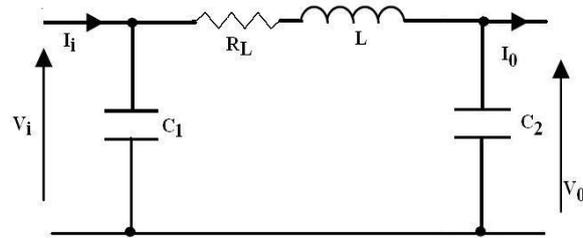


Fig. 7: Circuit équivalent du Boost, S fermé (a)

$$dT_s < t < T_s$$

$$\begin{cases} i_{C_1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C_2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = i_L - i_0 \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_0 - R_L i_L \end{cases} \quad (17)$$

## 2.4 Systèmes MPPT

Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique  $I = f(U)$  est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairage, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique, reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge [6].

Il existe différents types de contrôleurs MPPT. Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour une application spécifique. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres:

- Le rendement global du système désiré par le constructeur
- Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique.
- L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux.)
- Les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse, qualité
- Le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux).

### 3. SERRES AGRICOLES

Dans toutes les serres, il existe toujours des périodes pendant lesquelles, la température, ou l'humidité relative à l'intérieur de la serre devient extrêmement dangereuse pour la plante. Ceci arrive à cause de l'incapacité de l'homme à avoir des jugements précis et rapides.

Beaucoup de systèmes automatiques réalisent des opérations que l'homme est incapable de faire. Le contrôle automatique et la régulation peuvent donc se substituer à l'intervention de l'homme en réalisant un meilleur travail et en le libérant de contraintes astreignantes de surveillance.

Les différents contrôles dans une serre, s'appliquent à plusieurs paramètres, tels que l'humidité relative de l'air, la température, la luminosité et le taux de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

Dans notre travail, nous ne considérerons que deux paramètres seulement, ceux sont la température ambiante et le taux d'humidité relatif de l'air.

#### 3.1 Microclimat

Un microclimat est un ensemble de conditions atmosphériques qui caractérise un espace homogène de faible étendue. On l'utilise souvent pour définir le climat de certains petits sites géographiques [7].

Le déroulement de la croissance et du développement des différents organes d'une plante, d'une culture, obéit étroitement aux conditions climatiques qui peuvent causer des dégâts énormes.

Pour cela, on considère le climat comme un facteur de rendement qu'il faut essayer de maîtriser afin d'avoir des rendements optimaux de diverses cultures.

#### 3.2 Composantes du microclimat

La température, l'hygrométrie, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et la durée d'éclairage sont les éléments principaux sur lesquels il faut veiller pour commander au mieux l'atmosphère d'une serre. Ceci a des conséquences sur la croissance, l'initiation florale, la fructification, la précocité de maturité, la qualité des récoltes et les problèmes parasitaires [8].

##### 3.2.1 Température

Les températures basses provoquent des troubles qui peuvent être irréversibles constituant une plasmolyse cellulaire (l'eau rejetée peut geler dans les méats), le ralentissement, puis l'arrêt des fonctions cellulaires. Elles provoquent des altérations plus poussées avec l'apparition de glace au sein du cytoplasme et de la vacuole.

Les feuilles résistent aux températures élevées grâce à la transpiration qui provoque un certain refroidissement. La germination ne se produit que dans des limites assez étroites de la température. En effet en dessous d'une certaine valeur, la graine ne peut plus germer et au-delà d'une autre le phénomène de germination devient impossible.

La température agit également sur la photosynthèse Celle-ci ne commence à s'exercer qu'à partir d'une certaine température optimale (30 °C), et dont l'assimilation chute et s'annule peu après 45 °C, [9]. L'inhibition est d'autant plus marquée que la température excessive dure plus longtemps.

Les sources de variation de température dans une serre sont causées par le rayonnement solaire et par la réflexion du rayonnement de grande longueur d'onde la nuit.

### Transferts de chaleur

L'existence de phénomènes thermiques plus complexes régit le comportement thermique de la serre qui transfère un état température vers un état chaleur. Ce dernier est défini comme correspondant à une variation de la température. Il existe différents modes de transfert de chaleur: par convection, conduction et ou rayonnement.

#### a- Transfert de chaleur par conduction

Ce mode de transfert correspond à un phénomène microscopique dans lequel les constituants atomiques ou moléculaires transmettent de proche en proche, par mécanisme de choc ou d'interaction à distance, une énergie d'agitation thermique sans déplacement microscopique de matière.

Le flux de chaleur par conduction s'exprime par la formule:

$$\Phi = -\alpha A \frac{d\theta}{da} \quad (18)$$

(Le signe moins indique que la chaleur se transmet de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide). Avec:  $\alpha$  le coefficient de conductivité;  $A$  la section du solide;  $d\theta$  la différence de température et  $da$  : longueur parcourue par conduction.

#### b- Transfert de chaleur par convection

Il correspond à des transferts d'énergie liés aux déplacements des fluides qui correspondent dans notre cas à l'air. Selon la nature des mécanismes engendrant le mouvement des fluides, on distingue, soit une convection naturelle, soit une convection forcée.

La quantité de chaleur échangée par convection entre un fluide à température  $\theta_1$  et un solide à température  $\theta_2$  s'écrit:

$$Q = h.S.(\theta_1 - \theta_2) \quad (19)$$

Avec:  $h$  le coefficient de convection et  $S$  la surface d'échange.

#### c- Transfert de chaleur par rayonnement

Il transmet l'énergie sans support matériel par le biais d'une onde électromagnétique solaire. Ce transfert est défini à travers l'exemple suivant: un corps noir porté à la température  $T$  émet un rayonnement dont l'énergie rayonnée par unité de temps et de surface est:

$$Q = \sigma.T^4 \quad (20)$$

### 3.2.2 Humidité

On a coutume de dire que l'atmosphère saturante de la serre en début de journée favorise la prolifération et le développement des champignons et de divers prédateurs qui trouvent dans le milieu confiné de la serre une source intarissable. Pour contrer ce phénomène, il s'avère nécessaire de contrôler cette humidité en agissant sur les autres

caractéristiques du milieu (lumière sous serre, température ambiante) bien que l'humidité peut empêcher certains parasites des plantes qui prolifèrent dans un climat sec.

De plus, dans une serre, l'humidité augmente par rapport à l'extérieur dû à l'absence de renouvellement d'air. Ainsi, durant la nuit, un phénomène de condensation sur la couverture se produit augmentant le taux d'humidité sachant qu'à un taux de 90 % la fonction de la reproduction est inhibée [10]. L'élévation de la température pendant le jour tend à diminuer cette humidité.

### Humidité relative

Le degré hygrométrique (humidité relative) dans une serre est inversement proportionnel à la température de l'air. L'élévation diurne de cette dernière engendre automatiquement une chute de l'humidité relative si la quantité d'eau est restée constante. L'humidité relative de l'air est décrite par [11]:

$$H_i = \frac{100 x_i P}{0.611 P_{\text{sat}} (T_i)} \quad (21)$$

$H_i$  est l'humidité relative de l'air (%),  $P_{\text{sat}}$  la pression de vapeur saturante (Pa) et  $P$  la pression de l'air (Pa).

### 3.3 Consignes pratiques de température et d'hygrométrie

La maîtrise des températures et de l'hygrométrie doivent être traitée ensemble, car il n'est pas possible de faire varier l'un des deux paramètres sans faire modifier l'autre. Le chauffage a un effet déshumidifiant. L'aération a un effet rafraîchissant et déshumidifiant. L'humidification de l'air a un effet rafraîchissant.

#### 3.3.1 Consignes d'humidité

Il n'existe pas réellement de recommandations espèce par espèce. Tout au plus peut-on dire que:

- Pour la phase de multiplication, l'humidité relative doit être supérieure à 80 % ;
- Pour les phases de croissance, de floraison et de fructification, la plupart des plantes s'accommodent d'une humidité relative comprise entre 60 et 80 %, à l'exception des plantes vertes et du concombre qui préfèrent une hygrométrie supérieure à 70 %, et des plantes succulentes (Cactacées) qui préfèrent une humidité relative comprise entre 30 et 60 %. La pollinisation chez la tomate requiert une humidité relative comprise entre 50 et 70 %.

On peut aussi donner les conseils généraux suivants:

- éviter les condensations;
- éviter les hygrométries proches de la saturation (100 %);
- éviter les hygrométries inférieures à 40 % chez les plantes arrosées de manière incorrecte et chez les jeunes plantes qui n'ont pas encore été 'durcis';
- éviter absolument les hygrométries inférieures à 20 % [12].

#### 3.3.2 Consignes de température

La détermination des consignes de température est très délicate. En attendant de disposer de modèles élaborés qui prennent en considération la physiologie des plantes, les échanges de chaleur et les données économiques, nous avons utilisé les valeurs

consacrées par l'usager ou fournies par la littérature [13]. Ce sont en général les fournisseurs de matériel végétal qui donnent les meilleurs conseils en matière de consigne de température.

### 3.4 Energies renouvelables pour le chauffage des serres (énergie solaire)

La serre elle-même est un capteur solaire à la fois biologique (photosynthèse) et thermique (effet de serre). Le capteur thermique est même très souvent trop efficace puisqu'il faut fréquemment aérer et donc rejeter de la chaleur à l'extérieur [14].

### 3.5 Modèle dynamique d'une serre agricole

Le modèle dynamique de la serre est non-linéaire et de ce fait très compliqué. Généralement pour la modélisation des serres, les chercheurs se basent sur les bilans d'énergie et de masse de la serre.

Sachant que le système 'serre' est régi par les lois de la thermodynamique, il est nécessaire d'établir les expressions générales des principes.

#### Modèle proposé

Dans la littérature, il existe plus d'un modèle de serre. Dans ce travail, nous avons choisi le modèle dynamique d'une serre agricole situé en Espagne décrit par les équations (22)-(24) [15].

Notre travail consiste à développer une commande permettant d'atteindre les objectifs concernant la productivité à travers l'établissement d'un algorithme de commande floue.

Dans l'article lié à notre travail [15], les auteurs se sont basés sur l'identification d'un type de serre chaude. Celle-ci est considérée comme un volume d'air délimité par des parois, un toit et un sol. Ils se sont basés sur le bilan énergétique et le bilan de masse et y compris le comportement biologique des plantes. Deux sous-systèmes ont été établis, il s'agit du volume de l'air et de la terre, qui elle, agit en tant que masse thermique.

Les variables d'état appropriées pour décrire le comportement climatique sont: la température intérieure  $T_i$ , l'humidité relative  $H_i$  et la température  $T_m$  de la terre (appelée température de masse thermique) [15].

A partir de la masse d'eau, du bilan énergétique et du comportement biologique des plantes, les équations du modèle dynamique de la serre obtenues sont décrites par:

$$\rho v_i \frac{dH_i}{dt} = F_v + C_{sat} \cdot (E + fog) \quad (22)$$

Avec  $\rho$  la densité de l'air ( $\text{kg}_{\text{air}} \text{m}^{-3}$ );  $v_i$  le volume de la serre ( $\text{m}^3$ );  $F_v$  le taux de l'eau dans l'air renouvelé ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{s}^{-1}$ );  $C_{sat}$  le coefficient de saturation de l'air;  $fog$  est le taux de l'eau dans l'humidificateur ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{s}^{-1}$ ) et  $E$  est l'évapotranspiration des plantes ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{s}^{-1}$ ).

$$\rho v_i C_p \frac{dT_i}{dt} = Q_S - Q_{CC} + Q_m - C_{sat} \cdot (Q_e + Q_n) - Q_v + W \quad (23)$$

Avec:  $C_p$  la capacité thermique de l'air, ( $C_p = 1003 \text{ Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ );  $Q_S$  l'énergie solaire assurée au volume d'air;  $Q_{CC}$  l'échange d'énergie par le phénomène de conduction - convection;  $Q_m$  l'échange d'énergie avec la masse thermique;  $Q_e$  les déperditions d'énergie dues à l'évapotranspiration des plantes;  $Q_n$  les déperditions d'énergie par nébulisation;  $Q_v$  les échanges d'énergie dus à la ventilation de fenêtre et  $W$  l'énergie du système de chauffage.

$$A_i C_m \frac{dT_m}{dt} = Q_{Sm} - Q_m - Q_f \quad (24)$$

Avec:  $A_i$  est la surface de la serre, ( $\text{m}^2$ );  $C_m$  la capacité de chaleur de la masse thermique, ( $\text{°C}^{-1}\text{m}^{-2}$ );  $Q_{Sm}$  est l'énergie stockée par la masse thermique pendant le jour; et  $Q_f$  les déperditions d'énergie par la terre.

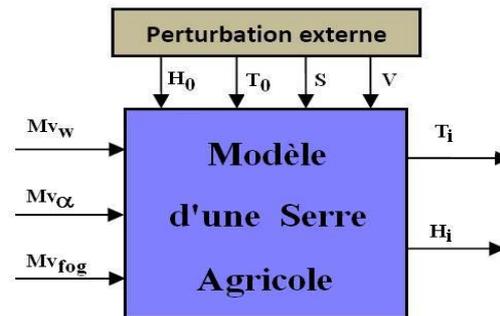


Fig. 8: Modèle dynamique de la serre

Le modèle d'entrée-sortie de la serre est décrit par la figure 8 où les variables à commander sont  $T_i$  et  $H_i$ , à travers l'ajustage des variables suivantes: ♦ ouverture et fermeture des fenêtres ( $Mv_\alpha$ ), ♦ le système de chauffage ( $Mv_w$ ) et ♦ le système de brouillard ( $Mv_{fog}$ ); et les paramètres suivants qui sont considérés comme des perturbations externes mesurables: ♦  $S$  le rayonnement solaire; ♦  $V$  la vitesse de vent; ♦  $T_0$  la température extérieure et ♦  $H_0$  l'humidité extérieure.

#### 4. COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE

L'utilisation de la commande floue est particulièrement intéressante, lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander ou lorsque ce dernier présente de trop fortes non linéarités ou imprécisions.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques aspects théoriques de la logique floue, ainsi que les bases de son application pour la commande du générateur photovoltaïque et de la serre.

Nous appliquerons cette commande à différents systèmes, tels que le MPPT, l'état de la charge de la batterie, ainsi que la commande des variables du microclimat de la serre.

Ce type de régulateur est défini par la figure 9 ci-après, où  $E_1$  et  $E_2$  sont les entrées et  $S$  la valeur de la commande.

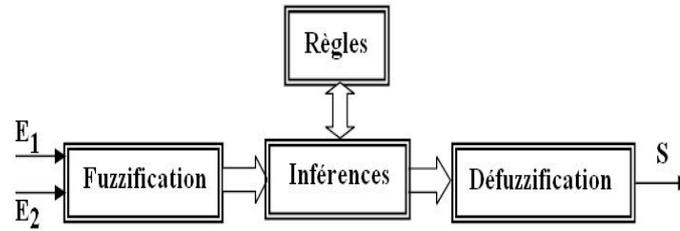


Fig. 9: Schéma synoptique d'un régulateur – contrôleur flou

#### 4.1 Poursuite du point de puissance maximale par un algorithme basé la logique floue

Les régulateurs flous ont été récemment utilisés dans la recherche du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques et éoliens. Ils ont l'avantage d'être robuste et relativement simple à concevoir car ils n'exigent pas la connaissance du modèle exact.

D'un autre coté, ils exigent la connaissance parfaite et complète du système PV par l'opérateur pour l'établissement des règles d'inférences.

Les deux variables d'entrée du contrôleur flou sont l'erreur  $E$  et la variation de l'erreur  $\Delta E$  prélevée à chaque pas d'échantillonnage  $k$ . Ces deux variables sont définies par les deux expressions suivantes:

$$E(k) = \frac{P_{ph}(k) - P_{ph}(k-1)}{V_{ph}(k) - V_{ph}(k-1)} \quad (25)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (26)$$

Avec:  $P_{ph}(k)$  la puissance instantanée du générateur PV et  $V_{ph}(k)$  la tension instantanée du générateur PV.

La valeur de  $E(k)$  montre, si le point de fonctionnement pour la charge utilisée à l'instant  $k$  se situe du côté gauche ou du côté droit du point maximum de puissance maximale sur la caractéristique de la courbe  $P(V)$ .

La valeur  $\Delta E(k)$ , elle exprime le sens de déplacement de ce point. La méthode choisie pour l'inférence, dans notre travail, est celle de Mamdani.

Quant à la défuzzification, c'est la méthode du centre de gravité qui a été préférée pour le calcul de la sortie  $D$  et qui représente le rapport cyclique du convertisseur DC-DC:

$$D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (27)$$

Ces trois variables sont décrites par les figures 10, et ainsi que la matrice d'inférence (**Tableau 1**).

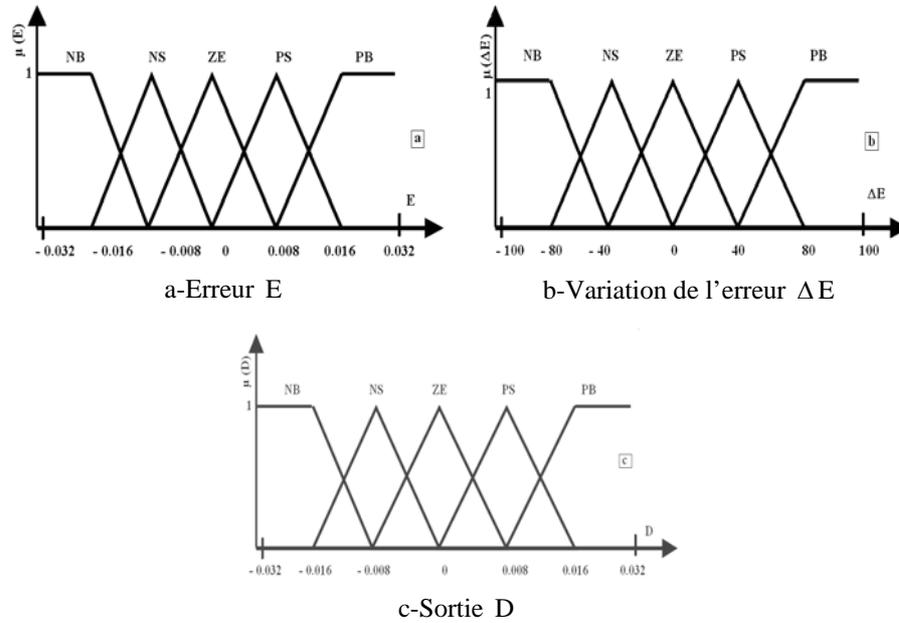


Fig. 10: Fonction d'appartenance des variables d'entrées

**Tableau 1:** Matrice d'inférence

E ↓ $\Delta E$ →	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	PB	PB	PB
NS	ZE	ZE	PS	PS	PS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	NS	NS	NS	ZE	ZE
PB	NB	NB	NB	ZE	ZE

#### 4.2 Simulation et résultats

Comme notre système est composé de deux systèmes distincts. Nous l'avons alors décrit par deux sous systèmes, à savoir: le premier qui prend en charge l'alimentation, le générateur photovoltaïque, plus le système de stockage, le second prend en charge la commande de la serre.

La figure 11 montre le diagramme fonctionnel du système photovoltaïque autonome. Avec: ● un panneau photovoltaïque; ● un convertisseur DC-DC<sup>1</sup> de type Boost; ● une batterie comme charge et ● un algorithme flou implémenté sur une carte DSP.

Les graphes ci-dessous présentent les signaux d'entrées et de sorties du régulateur flou, obtenus à partir d'une simulation sous environnement Matlab/Simulink.

Nous présenterons également les sorties du générateur photovoltaïque et les tensions délivrées à la charge.

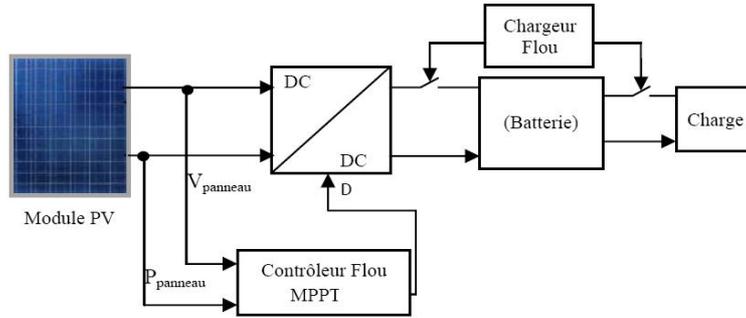


Fig. 11: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome

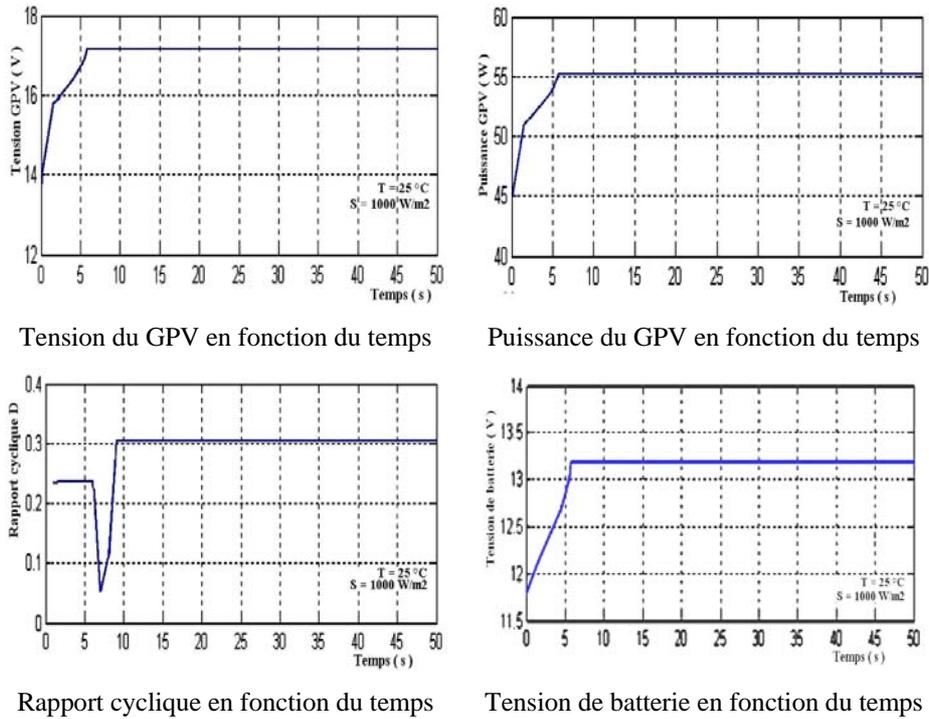
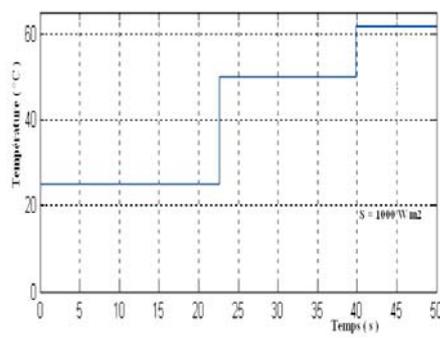


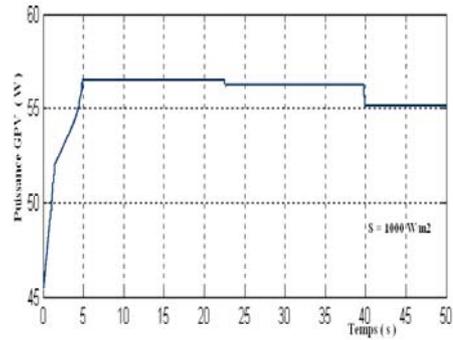
Fig. 12: Résultats de simulation

D'après les résultats des figures 12, nous constatons l'efficacité de l'algorithme MPPT choisi. Les temps de réponse des régimes transitoires semblent acceptables particulièrement pour l'application à laquelle nous nous sommes intéressés. Ces résultats sont en adéquation avec [16].

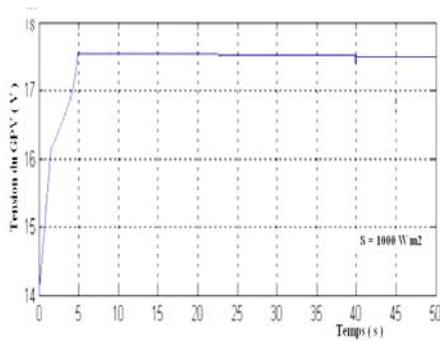
Pour valider notre algorithme, nous avons testé notre contrôleur pour diverses valeurs de température et d'insolation. Les résultats de simulations obtenus montrent l'efficacité et la robustesse de notre contrôleur pour la production de la puissance maximale par le générateur photovoltaïque, malgré l'existence des petites variations de puissance dues aux changements brusques de température, (Fig. 13).



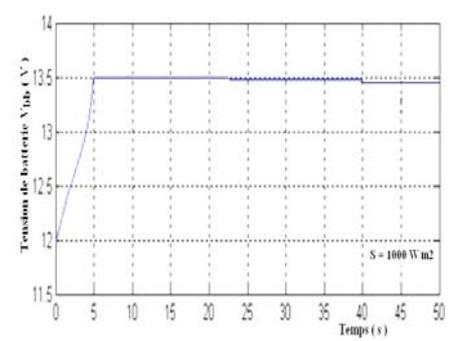
Température en fonction du temps



Puissance du GPV en fonction du temps



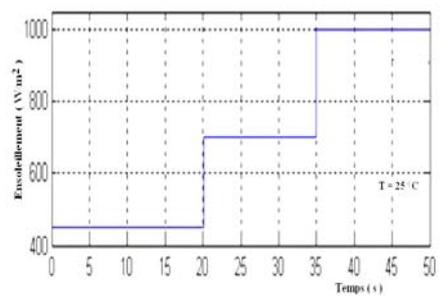
Tension du GPV en fonction du temps



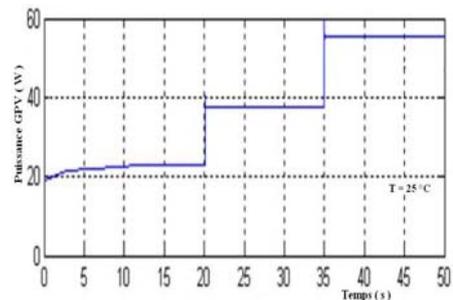
Tension batterie en fonction du temps

Fig. 13: Résultats de simulation

Les figures 14 montrent l'effet d'ensoleillement sur les systèmes PV. D'après les résultats, nous observons que le régulateur flou est robuste et qu'il suit la consigne quelque soit les variations de l'ensoleillement. Ces résultats sont acceptables du point de vue stabilité du système. La tension délivrée à la charge/batterie semble être supérieure à la tension acceptable. Ce problème sera par la suite résolu à travers un régulateur de tension.



Ensoleillement en fonction du temps



Puissance du GPV en fonction du temps

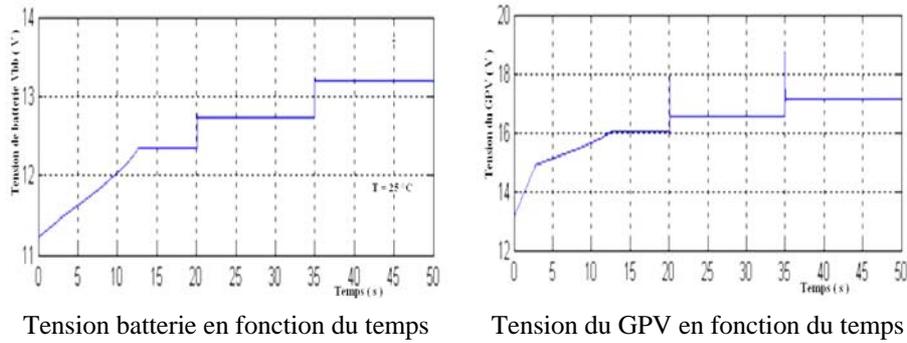


Fig. 14: Résultats de simulation

### 4.3 Chargeur de batterie de type flou

Généralement dans toutes les installations autonomes photovoltaïques, c'est-à-dire avec des éléments de stockage (batteries), il faut associer une protection (régulateur de charge) pour ces éléments, sachant que les batteries sont des éléments très sensibles et leur destruction facile.

Dans ce qui suit, nous proposons un régulateur de batterie intelligent de type flou où les entrées sont  $V_{bb}$ , tension de la batterie et  $\Delta V_{bb}$ , variation de tension de la batterie et les sorties sont K1, signal de commande du Switch 1 entre le GPV et la batterie [0,1] et K2, signal de commande du Switch 2 entre la batterie et la charge [0,1] (Fig. 15).

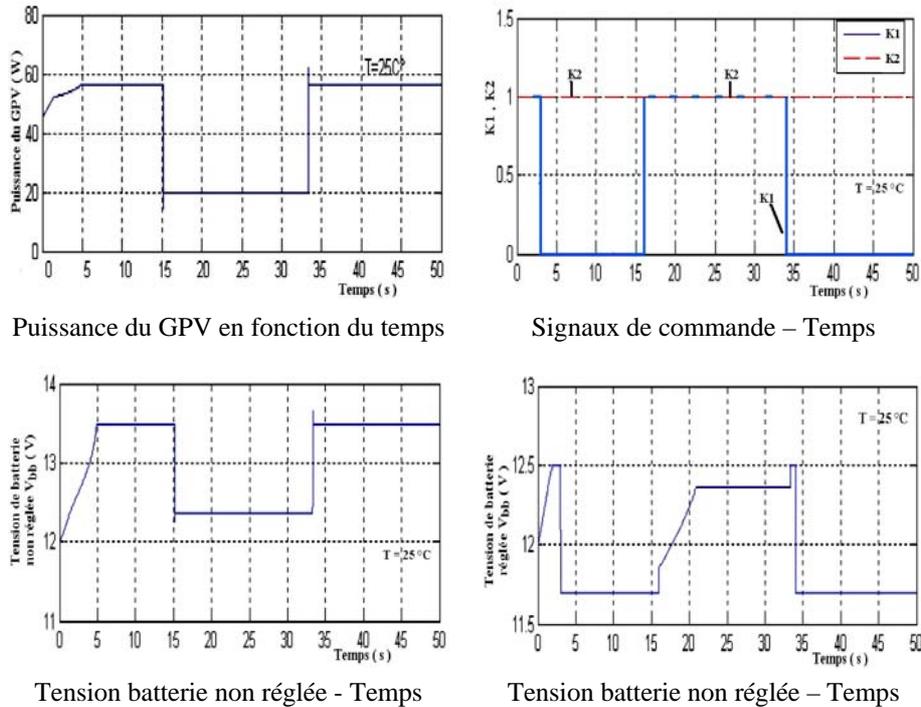


Fig. 15: Résultats de simulation

Lorsque l'ensoleillement change, la tension délivrée à la charge varie dans une plage de valeur comprise entre 11.7 et 12.5 V.

Nous déduisons de ce résultat que l'influence du régulateur sur la tension de charge est maximale, puisqu'il maintient cette tension dans une plage qui protège la batterie.

#### 4.4 Contrôle du climat d'une serre agricole (chaude)

Le contrôle du climat en général est un facteur très important, particulièrement aujourd'hui où presque tout se cultive sous serre.

Notre travail s'est basé sur le modèle d'une serre agricole située en Espagne. Le choix de ce modèle a été fait pour sa situation géographique qui, à peu près, présente les mêmes caractéristiques climatiques que celles de l'Algérie.

Le modèle, non-linéaire, défini par les équations 10, 11 et 12 est commandé par deux régulateurs flous, le premier pour la température, le second pour l'humidité, (Fig. 16) [15].

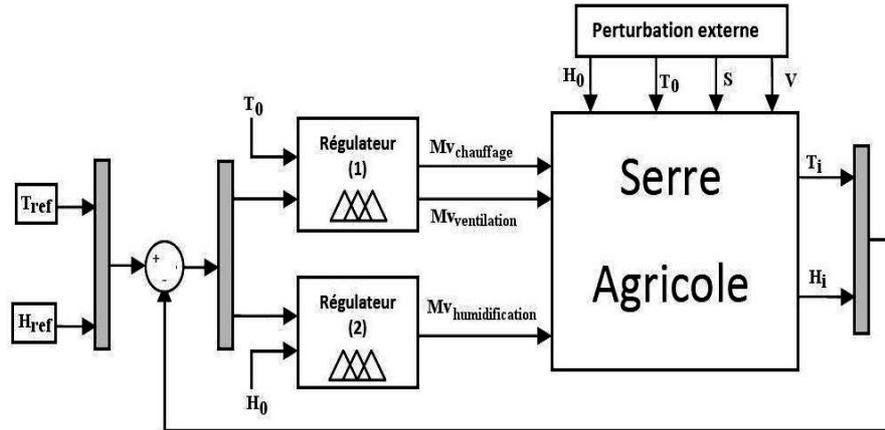
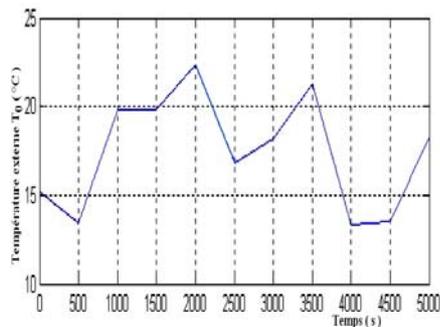
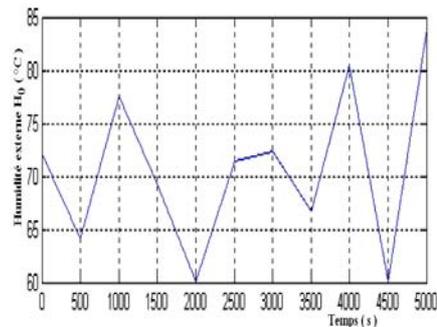


Fig. 16: Régulation de climat par logique floue

##### 4.4.1 Simulation et résultats



Température en fonction du temps



Humidité en fonction du temps

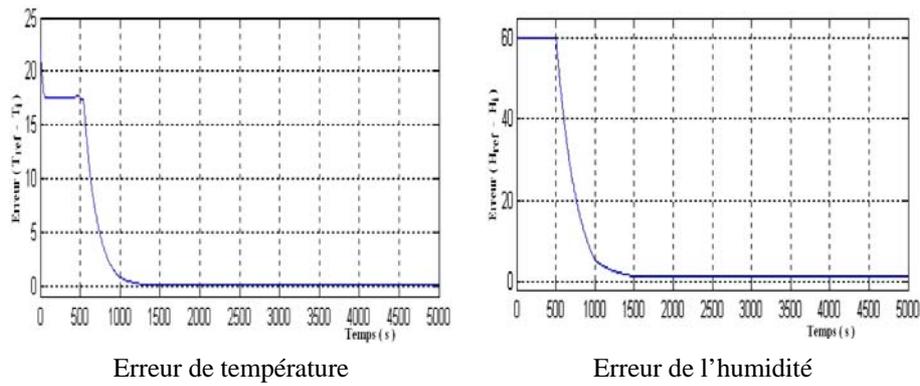
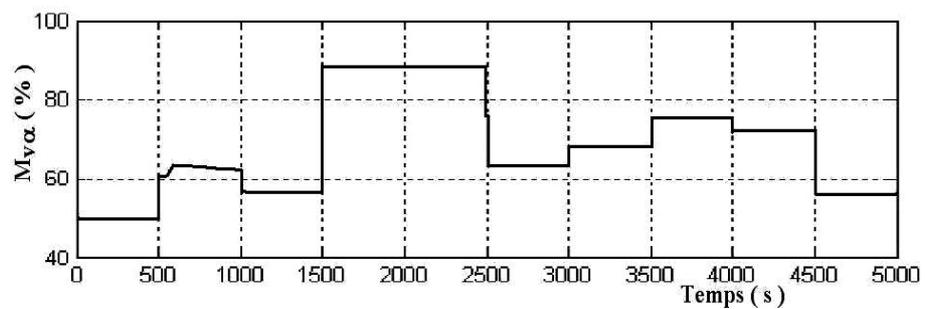
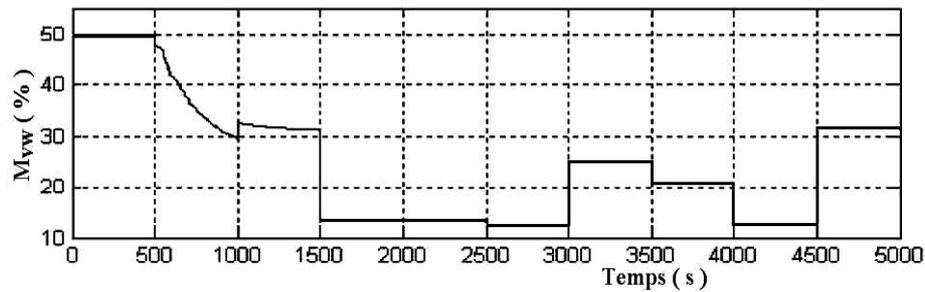


Fig. 17: Entrées des régulateurs

La figure 17 ci-dessus représente les deux entrées de chacun des deux contrôleurs du système.

Les deux graphes du haut représentent les perturbations externes de la température et l'humidité respectivement, et ceux du bas l'erreur entre la référence et la valeur à commander de la température ( $T_{ref} - T_i$ ) et l'humidité ( $H_{ref} - H_i$ ).

Dans notre simulation, nous avons choisi un pas de 500 s ( $\approx 9$  minutes), parce que les variations de la température et de l'humidité  $T_i$  et  $H_i$  sont assez lentes en réalité.



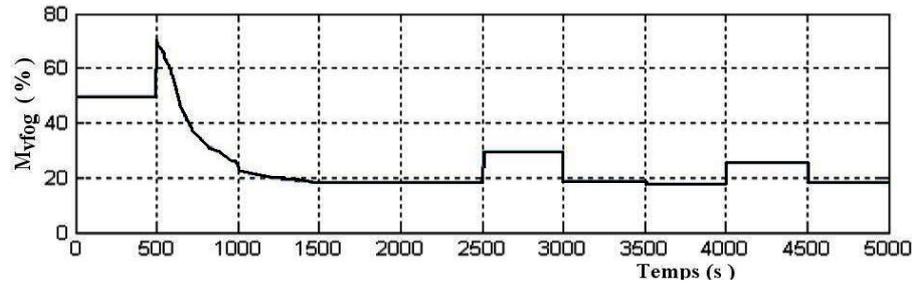
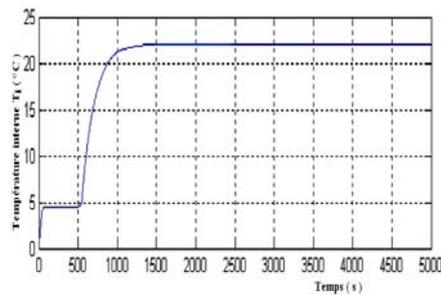


Fig. 18: Sorties des régulateurs

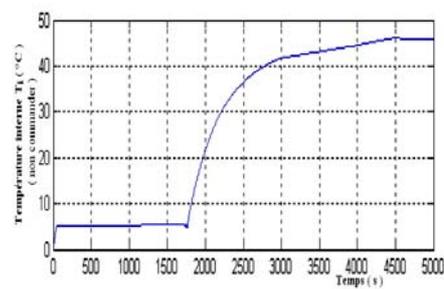
La figure 18 représente les trois sorties des régulateurs flous,  $M_{vw}$ ,  $M_{v\alpha}$  et  $M_{vfog}$ .

Les variations observées dans les courbes de ces régulateurs montrent qu'elles contrecarrent l'effet des perturbations introduites à travers la température externe et l'humidité externe.

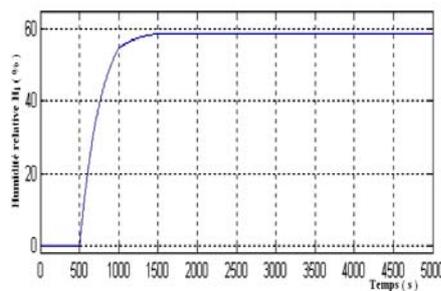
La figure ci après représente les courbes de la température et de l'humidité interne de la serre.



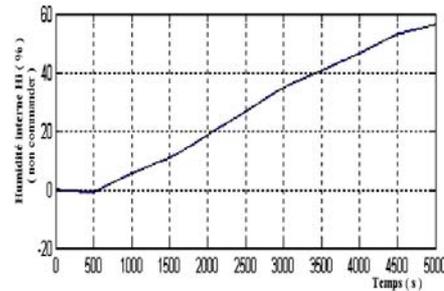
Température interne commandée



Température interne non commandée



Humidité interne commandée



Humidité interne non commandée

Fig. 19: Température et humidité interne (commandées et non commandées)

A partir des résultats de la figure 19, nous remarquons que, sans l'effet du régulateur, la réponse serait non seulement lente, mais aussi trop importante, (courbes du haut), ce qui aurait un effet néfaste sur des plantes fragiles qui y seraient cultivées.

En ce qui concerne l'humidité l'effet de notre régulateur est assez rapide et répond correctement aux besoins de la plante.

## 5. IMPLEMENTATION SUR DSP

### 5.1 Implémentation

Cette partie s'ouvre sur une implémentation des algorithmes de commande flous conçus sur une carte DSP TMX 320C6211. Seulement, deux régulateurs flous ont pu être implémentés, il s'agit:

- du MPPT flou;
- du chargeur de batterie flou.

La raison de cela est cette carte est limitée en capacité, puisqu'à chaque simulation le programme se bloque.

### 5.2 Résultats d'implémentation

Les sorties de chaque régulateur sont présentées par les figures 20 et 21. Les entrées des régulateurs sont des données récupérées à partir de MATLAB, et les vecteurs de sorties sauvegardés dans un fichier de sorties (.txt) à partir du CCS.

#### a- Premier régulateur

Pour ce régulateur, nous avons deux vecteurs d'entrées, l'erreur (E) et la variation de l'erreur ( $\Delta E$ ), le résultat est un vecteur de sortie, qui représente le rapport cyclique D.

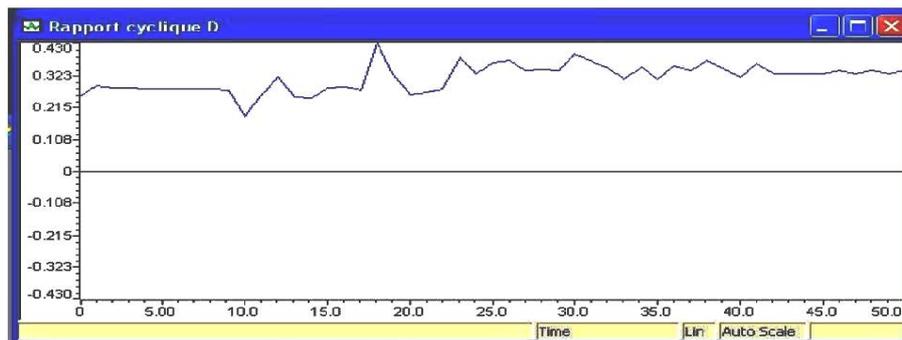


Fig. 20: Rapport cyclique D

Dans cette figure, on observe la réponse du régulateur, lors des changements des conditions météorologiques, et se stabilisé autour du point de puissance maximum ( $D \cong 0.3$ ).

#### b- Deuxième régulateur

Ce régulateur a deux vecteurs d'entrées, la tension de la batterie ( $V_{bb}$ ) et la variation de la tension de la batterie ( $\Delta V_{bb}$ ).

Le résultat, deux vecteurs de sortie, représente l'ouverture et la fermeture des interrupteurs K1 et K2 .

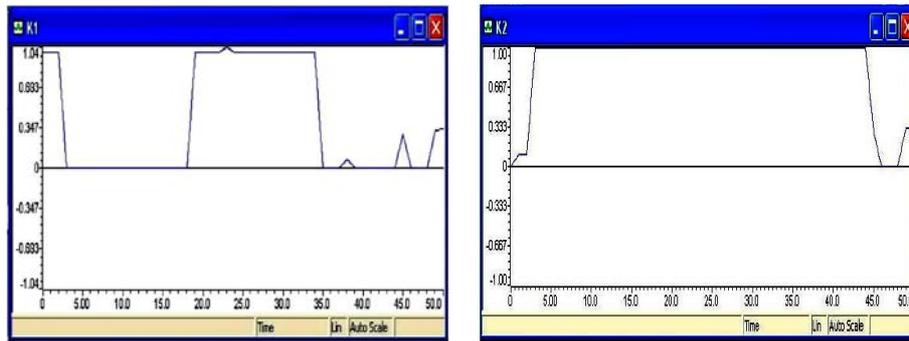


Fig. 21: Sortie du 2<sup>ème</sup> contrôleur

Les courbes ci-dessus présentent la réponse du deuxième contrôleur lors d'un changement de la tension de la batterie.

Le quatrième régulateur, lui, a deux vecteurs d'entrée, l'humidité externe  $H_e$ , et l'erreur entre la consigne et la mesure ( $H_{ref} - H_i$ ).

## 6. CONCLUSION

En Algérie, beaucoup de localités sont encore non électrifiées. Comme le coût de revient d'une installation d'un générateur photovoltaïque est de loin beaucoup moins onéreuse que celui d'une ligne électrique, il nous a paru intéressant d'utiliser ce type de source d'énergie, plutôt qu'une autre qui serait éventuellement polluante. Aussi à partir de ce constat, nous avons pensé à utiliser l'énergie solaire.

Pour ce type d'application, pour laquelle il ne nous semble pas utile de connaître le modèle exact de la serre, à cause de sa complexité, le type d'algorithme de commande choisi, qui est une commande en logique floue, est le plus adéquat, car il ne nécessite pas la connaissance du système, bien que pour des besoins de simulation nous avons dû utiliser un modèle mathématique.

Au vu des résultats obtenus, aussi bien pour le générateur photovoltaïque, dans la poursuite du point de puissance maximale, que pour la régulation de la charge et la décharge de la batterie ou pour la régulation des variables climatiques de la serre, il nous semble que l'algorithme choisi présente des résultats satisfaisants.

A cause d'un manque de matériel adéquat, nous n'avons pas pu intégrer la partie commande de la serre.

La carte que nous avons utilisée est de la famille C62xx de Texas Instrument. Elle est destinée au traitement de la parole, ce qui fait qu'elle est limitée.

## REFERENCES

- [1] H.J. Möller, 'Semiconductors for Solar Cells', Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.

- [2] H. Knopf, 'Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle', Master of Sciences in Electrical and Computer Engineering, Portland State University, 1999.
- [3] R. Gottschalg, M. Rommel, D.G. Infield and H. Ryssel, 'Comparison of Different Methods for the Parameter Determination of the Solar Cells Double Exponential Equation', In Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference (PVSEC), Barcelona, Spain, pp. 321 – 324, 30 June - 4 July 1997, 1997.
- [4] B. Wichert, 'Control of Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems', PhD Thesis, Curtin University of Technology, April 2000.
- [5] K. Sobaihi, 'Etude et Réalisation d'un Hacheur MPPT à Contre Réaction de Tension', Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2003.
- [6] Hua Chihchiang and Shen Chihming, 'Comparative Study of Peak Power Tracking Techniques for Solar Storage System', In IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'98, Vol. 2 of APEC Proceedings of the 1998, in 13<sup>th</sup> Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'98, pp. 679 - 685, Anaheim, CA, and IEEE, Piscataway, NJ, USA, 15 – 19 February 1998..
- [7] D. Achache, 'Contribution à la Détermination des Zones des Cultures Protégées dans l'Algérie à Partir de Deux Contraintes : Climat, Eau pour la Culture de la Tomate et du Poivron', Mémoire d'Ingénieur Agronome, INA, El Harrach, Alger, 1991.
- [8] J.M. Clément, 'Larousse Agricole', 1981.
- [9] I. Hurpy, 'Effets de Serres, Conception et Construction des Serres Bioclimatiques', Pyc Edition, Edisud, 1981.
- [10] M. Tifouri et C. Boussaid, 'Contrôle Automatique des Paramètres Agronomique dans une Serre', Mémoire d'Ingénieur Agronome, INA, El-Harrach, Alger, 2005.
- [11] N.J. Rosenberg, B.L. Blad and S.B. Verma, 'Microclimat: The Biological Environment', Edition Toronto, Canada, 1974.,
- [12] L. Urban, 'Introduction à la Production Sous Serre, 'La Gestion du Climat'', Edition Lavoisier, 1997.
- [13] A. Jaffrin and S. Makhlof, 'Mechanism of Light Transmission through Wet Polymer Films', Acta horticulturae 281: II Workshop on Greenhouse Construction and Design, 1978.
- [14] Y. Cornary et C. Nicolas, 'La Thermique des Serres', Edition Eyrolles, France, 1985.
- [15] X. Blasco, M. Martinez, J.M. Herrero, C. Ramos and J. Sanchis, 'Model-Based Predictive Control of Greenhouse Climate for Reducing Energy and Water Consumption', Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 55, N°1, pp. 49 – 70, 2007.
- [16] M.S. Aït Cheikh, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir and A. Zerguerras, 'Maximum Power Point Tracking Using a Fuzzy Logic Control Scheme', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°3, pp. 387 – 395, 2007.