



وزارة البحث العلمي و التعليم العالي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des sciences et de la technologie  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2020

**DEPARTEMENT DE L'ELECTROTECHNIQUE**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Présenté pour obtenir le diplôme de  
MASTER EN ELECTROTECHNIQUE  
Option : électrotechnique industrielle

préparé par

**-IKHLEF ABDELLAH**

**-MEDJEDDED SALAH**

**THEME**

**Dimensionnement d'un générateur photovoltaïque  
pour alimenter une serre agricole**

Soutenu le /08/2020 devant le jury composé de :

Président : M. LARBI BEKLAOUZ HADJ MCB à l'université de Mostaganem.

Examineur : M. BACHIRI FATHA. MCB à l'université de Mostaganem.

Encadreur : M. BEKKOUCHE BENAÏSSA. Professeur à l'université de Mostaganem.

Année universitaire 2019-2020

# REMERCIEMENTS

Nous tenons en premier lieu à remercier ALLAH.

Nous souhaitons ensuite remercier M. Bekkouche pour sa présence et son encadrement qui nous ont été d'une aide précieuse et qui nous ont permis d'avancer dans le bon sens dans notre travail.

Nous souhaite remercier M. LARBI BEKLAOUZ HADJ.

Nous souhaite aussi remercie M. BACHIRI FATHA.

Nous aimerions par la même occasion remercier, nos camarades qui avaient travaillé sur le même sujet l'année précédente et qui se sont montré très disponible pour nous aider à mieux cerner leur travail.

On n'oublie pas de remercier tous nos enseignants du département de « Génie électrique » pour les efforts qu'ils ont fournis durant notre cursus afin de nous amener jusqu'au bout de la formation.

A tous nos amis et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce manuscrit.

A Tous les membres de nos familles respectives, pour leurs soutiens moraux, affectifs et financiers.

## 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 d'étudier et connaître les différents types des serres agricoles ainsi leurs climats, aussi les différents technique de contrôles, puis concevoir et modéliser un générateur photovoltaïque pour alimenter une serre agricole autonome et de simuler des contrôleurs sur matlab/simulink, dont le rôle est la gestion de l'énergie électrique et le contrôle du climat dans la serre.

**Mots clés:** générateur photovoltaïque - Serres agricoles - Bilan d'énergie – contrôleurs - modéliser - matlab/simulink.

## 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 study and understand the different types of agricultural greenhouses and their climates also the different control techniques, then design and model a photovoltaic generator to supply an autonomous agricultural greenhouse and implement controllers on Matlab/simulink whose role is the electric energy management and the greenhouse climate control.

**Keys words:** Simulink- Agricultural greenhouse- Electric Energy- controlers- Climatic.

## ملخص

التغيرات السياسية للعالم تجاه مصادر الطاقة التي تستطيع ان تحل مكان الطاقة المهيمنة و الملوثة في آن واحد وهي البترول و الغاز هي حتمية متداولة بقوة, على غرار التقلبات المناخية, و عدم الإستقرار في أسعار البترول. الطاقة المتجددة و البديلة التي تمكنها من حل المشكلة في هذا العمل إستعملنا الطاقة المستجدة في البيوت الزراعية البلاستيكية التي تلعب دورا هاما في المجال الفلاحي. الهدف من هذه الدراسة هو تصميم و محاكاة الذكاء الإصطناعي في المبرمج "ماطلب", و كيفية التعامل مع الطاقة المتجددة و مراقبة المناخ داخل البيوت البلاستيكية. **كلمات المفاتيح:** الطاقة المتجددة - البيوت البلاستيكية - المبرمج "ماطلب" - الذكاء الإصطناعي.

# Liste des figures

**Figure I.1:** Une serre tunnel.

**Figure I-2:** Structure d'une Serre d'horticulture.

**Figure I-3:** échange d'énergie dans les systèmes de production de serre.

**Figure I-4:** Les différents modes d'aération latérale des serres.

**Figure I-5:** Aération double versants.

**Figure I-6:** modèle dynamique de la serre.

**Figure I-7:** Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

**Figure I-8:** Effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I-V et P-V.

**Figure I-9:** Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V.

**Figure I-10:** Schema bloc d'une batterie.

**Figure I-11:** Circuit électrique équivalent du convertisseur Boost.

**Figure I-12:** Circuit équivalent du Boost, S fermé.

**Figure II-3:** Circuit équivalent du Boost, S fermé.

**Figure II-1:** Structure du contrôleur PID adaptatif.

**Figure II-2:** Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.

**Figure II-3:** Opérateur NON.

**Figure II-4:** Operateur OU.

**Figure II-5:** Operateur ET.

**Figure II-6:** Structure interne d'un régulateur par logique floue.

**Figure II-7:** Représentation schématique d'un réseau neuronal feedforward.

**Figure II-8:** Organigramme d'algorithme génétique.

**Figure III-1:** Schéma général d'une installation PV.

**Figure III-2:** Vue du site par satellite (Google Earth)

**Figure III-3:** coordonnées du site proposé par satellite.

**Figure III-4:** simulation des dimensions de la serre

**Figure III-5:** consommation de l'énergie en fonction du temps.

**Figure III-6:** la température extérieure en fonction du temps.

**Figure III-7:** l'humidité en fonction du temps.

**Figure III-8:** l'humidité intérieure et extérieure.

**Figure III-9:** la température extérieure en fonction du temps.

**Figure III-10:** l'humidité en fonction du temps.

**Figure III-11:** l'humidité intérieure et extérieure.

**Figure III-12:** la température extérieure en fonction du temps.

**Figure III-13:** l'humidité en fonction du temps.

**Figure III-14:** l'humidité intérieure et extérieure.

**Figure III-15:** la température extérieure en fonction du temps.

**Figure III-16:** l'humidité en fonction du temps.

**Figure III-17:** l'humidité intérieure et extérieure.

**Figure III-18:** température interne en fonction de l'irradiation solaire.

**Figure III-19:** la puissance en fonction du temps.

**Figure III-20:** la puissance en fonction du temps.

**Figure III-21:** la puissance en fonction du temps.

**Figure III-22:** la puissance en fonction du temps.

**Figure III-23:** Irradiation solaire pendant l'hiver.

**Figure III-24:** Irradiation solaire pendant l'été.

**Figure III-25:** La température extérieure pendant l'hiver.

**Figure III-26:** La température extérieure pendant l'été.

**Figure III-27:** le cout totale autour de l'année.

**Figure III-28:** Technologies principales d'électrodes

**Figure III-29:** Vue schématique d'un accumulateur Plomb-Acide

**Figure III.30:** Convertisseur DC/DC

**Figure III.31:** Circuit électrique équivalent du convertisseur Boost

**Figure III-32:** interface graphique du logiciel SAM.

**Figure III-33:** caractéristiques des modules photovoltaïques.

**Figure III-34:** courbe caractéristique du photocellule.

**Figure III.35:** courbe du décharge de la batterie.

**Figure III-36:** cycle de dégradation de la batterie.

**Figure III-37:** puissance de la sortie.

**Figure IV-1:** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome

**Figure IV-2:** schéma simulink des cellules photovoltaïque.

**Figure IV-3:** caractéristique courant-tension

**Figure IV-4:** représentation de la puissance.

**Figure IV-5:** schéma simulink MPPT.

**Figure IV-6:** courant de charge.

**Figure IV-7:** tension de charge.

**Figure IV-8:** la puissance en fonction du temps.

**Figure IV-9:** système serre agricole

**Figure IV-10:** Régulation de climat par logique floue

**Figure IV-11:** Contrôle de la température de la serre en utilisant un contrôleur pid.

**Figure IV-12:** Régulation de la température en fonction du temps.

**Figure IV-13:** Sortie du régulateur PID.

**Figure IV-14:** L'écart entre la consigne et la mesure

**Figure IV-15:** schéma simulink du régulateur de température floue.

**Figure IV-16:** représentation des entrées et sorties floues du régulateur.

**Figure IV-17:** les règles d'interférence.

**Figure IV-18:** régulation de la température en fonction du temps.

**Figure IV-19:** l'écart entre la mesure et la consigne en fonction du temps.

**Figure IV-20:** couple de régulateur floue.

**Figure IV-21:** shéma simulink du régulateur PD de l'humidité.

**Figure IV-22:** Régulation de l'humidité en fonction du temps.

**Figure IV-23:** Sortie du régulateur PD.

**Figure IV-24:** L'erreur en fonction du temps.

**Figure IV-25:** Schéma simulink de régulateur floue de l'humidité.

**Figure IV-26:** variation des sorties de type sugeno par rapport aux entrées floue

**Figure IV-27:** schéma de la configuration des entrées et sortie floue sous Matlab.

**Figure IV-28:** sortie du système par rapport au consigne en fonction du temps.

**Figure IV-29:** l'erreur en fonction du temps.

**Figure IV-30:** couple à la sortie du régulateur.

**Figure IV-31:** régulation avec réseaux de neurones.

**Figure IV-32:** réseau de neurone avec 3 entrées, et 4 sorties.

## Liste des tableaux

**Tableau I.1:** Intervalles des températures optimales pour la croissance de certains légumes.

**Tableau II.1:** Différentes structures du régulateur PID.

**Tableau II.2:** Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurones.

**Tableau III.1 :** la puissance annuelle estimé pour alimenter la serre.

**Tableau III.2 :** L'irradiation moyenne annuelle.

**Tableau III.3 :** budget totale

**Tableau IV.1:** les données d'entrée/sortie pour l'apprentissage.

# Table des matières

## Chapitre I : Généralité sur les serres agricoles et le système photovoltaïque

I.1 Introduction .....	1
I.2 Description de la serre et de son microclimat.....	1
1.2.1 Les serres tunnels.....	1
1.2.2 Les serres d'horticultures .....	1
1.2.3 Microclimat d'une serre agricole.....	2
1.2.4 Température.....	2
1.2.5 transferts de chaleur .....	3
1.2.5.1 Transfert de chaleur par conduction .....	3
1.2.5.2 Transfert de chaleur par convection .....	3
1.2.5.3 Transfert de chaleur par rayonnement .....	4
1.2.6 Humidité.....	4
1.2.6.1 Humidité relative.....	4
I.3 Consignes pratiques de température et d'hygrométrie.....	5
I.3.1 Consignes d'humidité.....	5
I.3.2 Consignes de température.....	5
I.4 Aération de la serre.....	5
I.5 Gestion de la serre.....	6
I.5.1 Capteur de température.....	6
I.5.2 Capteur d'humidité.....	7
I.6 Équipements de régulation.....	7
I.6.1 Chauffage .....	7
I.6.2 Ventilation .....	7
I.6.3 Humidification .....	7
I.6.4 Brumisateur .....	7
I.6.5 Écran de refroidissement .....	7
I.6.6 Arrosage des allées .....	8
I.6.7 Ventilation :.....	8
I.6.8 Déshumidification .....	8
I.7 Système photovoltaïque.....	8
I.7.1 Energies renouvelables pour le chauffage des serres.....	8

I.7.2	Modèle dynamique d'une serre agricole.....	9
I.7.2.1	Modèle proposé.....	9
I.7.2.2	Modélisation du module.....	10
I.7.3	Stockage de l'énergie (Batterie).....	13
I.7.3.1	Chargeur de batterie.....	14
I.7.4	Convertisseurs DC-DC (Hacheurs) .....	15
I.7.4.1	Hacheur parallèle (Boost) .....	15
I.7.5	Systèmes MPPT.....	16
I.8	Conclusion .....	17
<b>Chapitre II : Les techniques de contrôle et de commande</b>		
<b>de la gestion climatique des serres agricoles</b>		
II.1	Introduction.....	18
II.2	Techniques de contrôles.....	18
II.2.1	Contrôle Classique.....	18
II.2.2	Le régulateur PID.....	19
II.2.3	La régulation par logique floue.....	20
II.2.3.1	Notion de commande floue.....	20
	a) Description d'un procédé .....	21
	b) Fonction d'appartenance .....	21
II.2.3.2	Les opérateurs de la logique floue .....	22
	a) Opérateur NON (complément, négation, inverse).....	22
	b) Operateur OU (maximum) .....	22
	c) Opérateur ET (minimum) .....	23
II.2.3.3	Inférence à plusieurs règles .....	24
	a) Fuzzification .....	24
	b) Bases de règles et inférences .....	24
	c) Défuzzification .....	25
II.2.4	Réseaux de neurones feedforward .....	25
II.2.4.1	Apprentissage des réseaux neuronaux .....	25
II.2.4.2	Apprentissage supervisée .....	26
II.2.4.3	Apprentissage par renforcement .....	26
II.1.4.1	Apprentissage non supervisée .....	27
II.2.4.2	Applications des réseaux neuronaux feedforward.....	27
II.3	Avantages et inconvénients de la logique floue et des réseaux de neurones.....	27

II.4 Algorithmes génétiques.....	28
II.5 Principales attractions des algorithmes génétiques.....	29
II.6 Conclusion.....	30

**Chapitre III : Dimensionnement et optimisation énergétique  
du système photovoltaïque**

III.1 Introduction .....	31
III.2 Dimensionnement d'un système photovoltaïque.....	31
III.2.1 Norme et conception.....	31
III.2.2 Algorithme de la méthodologie de conception.....	32
III.3 Présentation du site et évaluation de la ressource solaire.....	34
III.3.1 Coordonnées géographiques du site.....	34
III.3.2 Estimation d'une serre agricole semi-fermée .....	35
III.3.3 Exploitation des logiciels .....	35
III.3.3.1 Logiciel Hortinergy .....	35
III.3.3.2 Les dimensions de la serre .....	36
III.3.4 Données météorologiques.....	36
III.3.5 Détermination de la puissance de dimensionnement.....	37
III.4 Le Climat à l'intérieur de la serre .....	38
III.4.1 Le Climat de la serre agricole du mois de janvier .....	38
III.4.2 Le Climat de la serre agricole du mois de mars .....	39
III.4.3 Le Climat de la serre agricole du mois de mai .....	40
III.4.4 Le Climat de la serre agricole du mois de novembre .....	41
III.5 Température en fonction de la radiation solaire .....	42
III.6 Consommation de l'énergie électrique .....	42
III.6.1 Consommation de l'énergie du mois de janvier .....	42
III.6.2 : Consommation de l'énergie du mois de mars .....	43
III.6.3 : Consommation de l'énergie du mois de mai .....	43
III.6.4 Consommation de l'énergie du mois de novembre .....	43
III.7 Irradiation solaire .....	44
III.7.1 L'irradiation solaire pendant l'hiver.....	44
III.7.2 L'irradiation solaire pendant l'été.....	45
III.8 Climat extérieur .....	45
III.9 Budget .....	46

III.10.1 Déterminer la consommation électrique totale.....	47
III.10.2 Détermination de la puissance de dimensionnement.....	47
III.10.3 Le nombre d'heures équivalent .....	47
III.11 Dimensionnement du stockage.....	48
III.11.1 Les principaux domaines d'application.....	48
III.11.2 Caractéristiques des accumulateurs.....	50
III.12 Dimensionnement du régulateur.....	50
III.13 Dimensionnement des convertisseurs.....	51
III.14 Convertisseur Boost (survolteur).....	51
III.15 Exploitation du Logiciel SAM.....	53
III.16 CONCLUSION.....	56

## **Chapitre IV : MODILISATION**

### **Et SIMULATION**

IV. Simulation et résultats.....	57
IV.2 Régulation par contrôleur Mppt .....	59
IV.3 Chargeur de batterie.....	59
IV.4 Définition du système.....	61
IV.5 Contrôle du climat d'une serre agricole.....	62
IV.6 Régulation de la température de la serre en utilisant un régulateur PID .....	63
IV.6.1 Simulations et résultats .....	63
IV.6.2 Contrôle de la température par un contrôleur floue .....	65
IV.7 Régulation de l'humidité de la serre en utilisant un régulateur PD .....	68
IV.7.1 Contrôle de l'humidité par un contrôleur floue .....	69
IV.8 Comparaison des résultats .....	72
IV.9 Contrôle du climat de la serre avec un réseau de neurone artificiel.....	72
IV.9.1 Codage des entrées pour mise à l'échelle (monde réel → entrée de neurone) .....	73
IV.9.2 Codage des sorties pour mise à l'échelle (sortie de neurone → monde réel).....	73
IV.9.3 Diagramme de notre RNA .....	73
IV.10 CONCLUSION.....	76

Conclusion Générale.

Annexe.

Bibliographie.

# Introduction Générale

La culture sous serre, connaît depuis quelques décennies un développement important, dû essentiellement à la croissance grimpante de la population et l'élévation continue de son niveau de vie. Cet état de fait, entraîne une demande à la consommation de plus en plus forte et exigeante. La succession périodique de la production agricole sous abris, sur toute l'année en fonction de l'état d'équilibre entre l'offre et la demande, implique de facto, une exploitation efficace des terres agricoles et une utilisation rationnelle de la main-d'œuvre de plus en plus réduite, permanent, spécialisée et hautement qualifiées. La serre conçue à l'origine, comme une enceinte limitée par une paroi transparente aux rayonnements solaire, comme c'est le cas de la serre conventionnelle, largement utilisée dans notre pays, amplifie certaines paramètres du climat environnant et accuse des conditions peu favorables à la croissance et au développement des cultures protégées. Ce type de serres traditionnelles assez répandue dans les pays du bassin méditerranéen, est confronté au refroidissement nocturne intense, qui se traduit parfois par l'inversion des températures intérieures et par des complications de surchauffe et variations hygrométriques selon les saisons. Les variations extrêmes de ces paramètres souvent observées à l'intérieur des abris, constituent une nuisance capable de freiner la croissance et le développement des cultures et dans le meilleur des cas, elles pénalisent le rendement et la qualité des produits. Pour répondre à l'équation d'offre et de la demande, des systèmes-serres se sont développés au fur du temps, imposant ainsi une grande maîtrise de gestion et de connaissance pour atteindre une production meilleure. Ce type de serres, équipées et matérialisées par un appui climatique ; sont un moyen permettant de transformer les conditions extérieures locales, en un microclimat opérationnelle, favorable à la croissance et au développement des cultures abritées. Le progrès technologique a œuvré considérablement au développement des serres agricoles. Elles deviennent très sophistiquées (systèmes de chauffage, climatisation, accessoires et équipements techniques d'accompagnement, ordinateur de régulation etc.). De nouvelles techniques ont émergées, parmi lesquelles l'utilisation d'appareils de contrôle et de régulation des variables climatiques dans une serre (température, humidité, concentration en CO<sub>2</sub> etc.) depuis le classique Jusqu'à l'exploitation de l'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones et ou /logique floue. L'application de l'intelligence artificielle dans l'industrie a connu un essor considérable, ce qui n'est pas le cas dans le domaine des serres agricoles, où son application reste timide. C'est à partir de cet état de fait, que nous avons engagé des travaux de recherche dans ce domaine et procéder à une simulation sur la base des donnée météorologiques à travers

MATLAB Simulink, pour enfin analyser le comportement thermo-énergétique du microclimat de la serre.

Ce travail, se compose de quatre chapitres qui se présentent comme suit :

**Premier chapitre :**

Nous exposons dans ce premier chapitre une description générale sur la serre et son microclimat, Une présentation sur les systèmes serres et tous les éléments, et phénomènes bio-physiques qui lui sont liés (paramètres climatiques extérieurs et intérieurs, système de climatisation, brumisation, phénomène biologique de la plante etc.) et les interactions thermo-hydrrique et énergétique qui se produisent en son sein. Par la suite, une deuxième partie, qui détermine le système photovoltaïque et le modèle dynamique de la serre agricole.

**Deuxième chapitre :**

On a fourni des informations de base essentielles sur les techniques du contrôle les plus appliqués pour la gestion de l'environnement de la serre tel que les techniques classiques comme, le PID et les contrôleurs intelligents pour les systèmes flous et les réseaux à neurones. Le système photovoltaïque ainsi le modèle dynamique de la serre.

**Troisième chapitre :**

Pour le troisième chapitre, nous avons montrés les différentes étapes pour dimensionner une serre agricole et les différentes éléments de l'installation ainsi le site de la serre agricole, puis on a étudié la consommation énergétique globale de la serre agricole pour cela on a utilisé deux logiciels de dimensionnement, SAM et Hortinergy.

**Quatrième chapitre :** Dans ce chapitre, on a décrit les modèles de connaissance physiques et dynamiques de la serre, la plante, les systèmes serres (chauffage refroidissement, ventilation, brumisation), les bilans énergétiques/massiques, la relation non linéaire du système, le couplage des paramètres du milieu interne de la serre ainsi que les hypothèses simplificatrices du modèle climatique à effet de serre. On a présenté aussi les étapes de la modélisation et de la simulation du modèle de contrôle, en utilisant le MATLAB SIMULINK. Suivi de discussions, commentaires, le tout couronné par une conclusion générale et des perspectives.

# Chapitre I

---

## Généralité sur les serres agricoles et le système photovoltaïque

## I.1 Introduction

La serre est considérée comme un milieu très confiné où plusieurs composantes s'échangent entre-elles. Les principaux facteurs du milieu interne de la serre sont : la température, la lumière, l'humidité. Les plantes situées sous abris recevant les rayons du soleil s'échauffent bien plus qu'à l'air libre : cela est dû à la suppression du vent et à la réduction de la convection de l'air, mais aussi aux propriétés physiques de la couverture de la serre (assez transparente pour le rayonnement solaire, mais autant absorbante pour l'infrarouge émis par le sol placé à température ordinaire, d'où effet de "piégeage" des radiations solaires). En été une surchauffe dangereuse est à craindre la ventilation naturelle ou forcée (mécanique) est indispensable pour refroidir la serre. En hiver, le chauffage s'impose en général soit par couches (chaleur de fermentation du fumier ou des feuilles mortes), ainsi que d'autres procédures biotechnologiques, soit par d'autres sources d'énergies (électricité, fuel, énergie solaire.).

## I.2 Description de la serre et de son microclimat

Il existe deux types de serres : Les serres tunnels et les serres d'horticulture.

### 1.2.1 Les serres tunnels

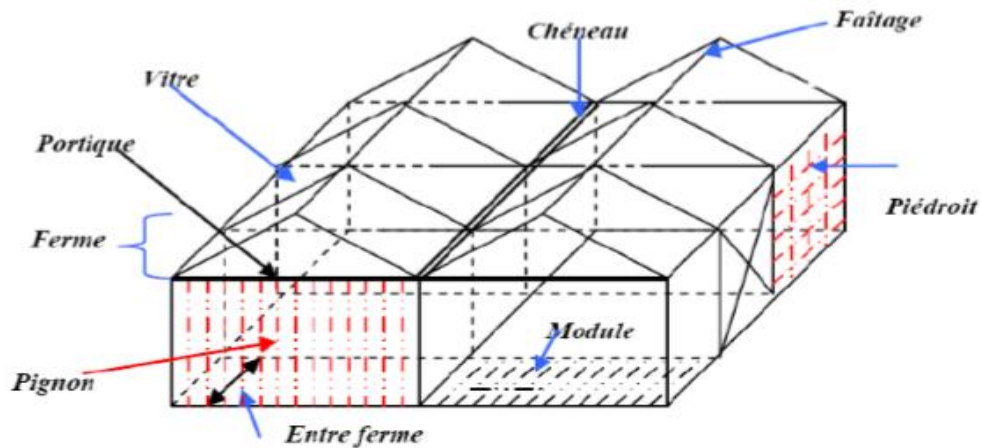
En général, la serre tunnel se compose d'une série d'éléments juxtaposés constitués chacune par une armature en tube d'acier et un film plastique se fixe par divers systèmes de clips qui coincent le film contre le profil. La figure (I-1) montre la forme d'une serre tunnel.



**Figure I-1:** Une serre tunnel.

### 1.2.2 Les serres d'horticultures

La chapelle est l'unité de construction de la serre formée par deux parois latérales verticales (ou très légèrement penchées) et un toit à deux pentes, généralement symétriques, la figure (I-2) montre les différents éléments d'une chapelle.



**Figure I-2** Structure d'une Serre d'horticulture

### I.2.3 Microclimat d'une serre agricole

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.

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.

### I.2.4 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. 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.

**Tableau I.1** : Intervalles des températures optimales pour la croissance de certains légumes

<b>culture</b>	<b>temperature</b>	<b>culture</b>	<b>temperature</b>
<b>Tomate</b>	18-23°C	<b>Melon miel</b>	13-18°C
<b>Laitue</b>	10-18°C	<b>Poivron</b>	18-23°C
<b>Radis noir</b>	20-26°C	<b>Chou</b>	15-23°C
<b>Haricots verts</b>	18-25°C	<b>Aubergine</b>	22-26°C
<b>paksoi</b>	20-24°C	<b>concombre</b>	22-26°C

### **I.2.5 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.

#### **I.2.5.1 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:

$$Q = - \alpha A \frac{d\theta}{da} \quad (\text{I.1})$$

(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.

#### **I.2.5.2 Transfert de chaleur par convection :**

Il correspond à des transferts d'énergie liés aux déplacements des fluides qui correspond 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:

$$Q = h . s . (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{I.2})$$

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

### 1.2.5.3 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:

$$Q = \sigma.T^4 \quad (I.3)$$

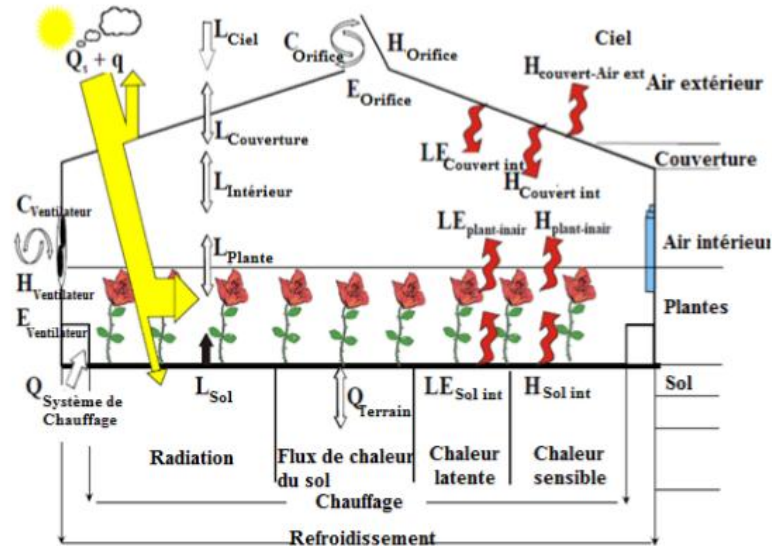


Figure I-3 : échange d'énergie dans les systèmes de production de serre.

### I.2.6 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. L'élévation de la température pendant le jour tend à diminuer cette humidité.

#### I.2.6.1 Humidité relative

Le degré hygrométrique (humidité relative) dans une serre est inversement proportionnel à la température de l'air. L'humidité relative de l'air est décrite par :

$$H_i = \frac{100 x_i P}{0.611 P_{sat}(T_i)} \quad (I.4)$$

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

### **I.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.

#### **I.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 (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 %.

#### **I.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'utilisateur ou fournies par la littérature. Ce sont en général les fournisseurs de matériel végétal qui donnent les meilleurs conseils en matière de consigne de température.

### **I.4 Aération de la serre**

L'aération se fait par ventilation et qui consiste à un échange d'air entre le milieu serre et l'extérieur, ce mécanisme permet d'évacuer la chaleur en excès pour diminuer la température de l'air ambiant ; de modifier l'humidité en évacuant plus ou moins rapidement l'air humide

provoqué par la transpiration des plantes. La figure (I-4) et la figure (I-5) montrent les différents modes d'aération utilisés..



**Figure I-4 :** Les différents modes d'aération latérale des serres.



**Figure I-5 :** Aération double versants.

## **I.5 Gestion de la serre**

La gestion du climat d'une serre demande l'acquisition de données, donc, l'installation de plusieurs capteurs météorologiques.

### **I.5.1 Capteur de température**

Plusieurs types de capteurs servent à mesurer la température (composants semi-conducteurs, diode à jonction, transistors, thermocouples, thermistances, détecteurs résistifs, etc.). Sous serre la précision du capteur de température est un facteur supplémentaire à prendre en considération, du point de vue de l'efficacité énergétique. Les semi-conducteurs permettent de réaliser des thermomètres électroniques à bas prix dont la plage d'enregistrement s'étend largement avec une bonne précision.

### **I.5.2 Capteur d'humidité**

Les hygromètres à variation d'impédance sont des capteurs dont l'élément sensible possède des propriétés hygroscopiques, c'est à dire, dont la teneur en eau varie en fonction du taux d'humidité de l'air avec lequel il est en équilibre.

## **I.6 Équipements de régulation**

### **I.6.1 Chauffage :**

Le chauffage permet d'adapter les apports de chaleur nécessaire aux besoins des cultures sous abris et de déshumidifier l'air. Il agit simultanément sur l'hygrométrie et la température de l'air. Une augmentation de la température favorise la déshumidification de la serre. L'intensité du chauffage est fonction de l'éclairement.

### **I.6.2 Ventilation :**

Le traitement de l'air a une fonction tout aussi importante que la lumière lorsque la culture est dans un espace clos. Un ventilateur permet de renouveler l'air et d'apporter du CO<sub>2</sub> nécessaire à la photosynthèse tout en garantissant une régulation de la température et de l'hygrométrie. Le mouvement horizontal de l'air offre plusieurs avantages. Plus particulièrement, il réduit sensiblement les gradients de la température dans la serre et diminue le taux d'humidité. Il favorise ainsi une grande homogénéité du climat sous serre.

### **I.6.3 Humidification :**

Plusieurs techniques d'humidifications permettent de faire augmenter l'humidité :

### **I.6.4 Brumisateur :**

Cet appareille fait augmenter l'humidité dans la serre. Il consiste à atomiser l'eau en fines particules (d'environ 10 µm). Ensuite un système à haute pression d'air les disperse dans le climat sous serre. Il s'agit d'un système qui produit de la brume sans laisser de gouttelettes sur les plants afin de ne pas favoriser le développement de maladies fongiques. La brumisation augmente le taux d'humidité dans la serre et diminue la température interne.

### **I.6.5 Écran de refroidissement :**

Bien qu'utilisé pour réduire la température de la serre, l'écran de refroidissement peut également servir pour accroître l'humidité. L'eau s'écoule à travers l'écran et permet de refroidir et humidifier l'air qui y circule de l'extérieur vers l'intérieur de la serre.

### **I.6.6 Arrosage des allées :**

Cette méthode, peu coûteuse, permet d'augmenter l'humidité de l'air mais de manière ponctuelle. Les effets bénéfiques de l'arrosage sur l'humidité se font sentir sur une très courte période.

### **I.6.7 Ventilation :**

La réduction de la ventilation naturelle, par la fermeture partielle ou totale des ouvrants contribue à accroître l'humidité de la serre sous certaines conditions. Ainsi, pour une culture dont la surface foliaire est importante, la fermeture des ouvrants peut entraîner un accroissement de la quantité de vapeur d'eau dans l'air. Cette vapeur d'eau provient de la transpiration des plantes. Cependant, lorsque l'humidité atteint une certaine valeur, la transpiration cesse et l'humidité ne pourra s'accroître davantage. Les deux possibilités à envisager sont le refroidissement de l'air et l'enrichissement en vapeur d'eau par la méthode combinée.

### **I.6.8 Déshumidification :**

L'humidité de l'air est généralement exprimée en taux d'humidité relative ou déficit hydrique. On constate que la technique de déshumidification traditionnellement employée par les producteurs combine l'aération et le chauffage. Le chauffage permet d'une part de diminuer l'humidité relative de l'air en augmentant la pression de vapeur saturante, d'autre part l'évacuation de l'air chaud chargé en humidité se fait par l'aération. Cette technique entraîne une perte d'énergie puisqu'une partie de l'énergie dégagée par le chauffage est évacuée par l'aération. La pratique de la déshumidification représente environ 20% à 30% des dépenses énergétiques. Afin de maintenir la transpiration active, il est essentiel d'éliminer l'excès d'humidité de la serre. L'évapotranspiration est fonction du déficit de pression de vapeur, de l'énergie disponible pour la vaporisation et du mouvement d'air à l'intérieur de la serre.

## **I.7 Système photovoltaïque**

### **I.7.1 Energies renouvelables pour le chauffage des serres (énergie solaire)**

C'est une énergie électrique produite au moyen de panneaux solaires qui permettent de convertir une partie du rayonnement solaire. L'électricité ainsi produite peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution. Une installation solaire photovoltaïque peut être implantée sur la serre maison individuelle, agricole. Avant, L'énergie solaire photovoltaïque était limité aux applications rurales pour l'alimentation des sites isolés en électricité comme cela a été le cas en Algérie. Mais depuis quelques années, le solaire

photovoltaïque a fait son entrée dans les agglomérations, ce qui a pour effet l'augmentation sensible de la demande en modules photovoltaïques. Afin de mieux exploiter cette énergie, il est nécessaire de connaître la distribution de l'irradiation solaire sur le lieu de l'implantation prévu pour l'installation photovoltaïque, pour différentes orientations et inclinaisons

### I.7.2 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.

#### I.7.2.1 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. Notre travail consiste à développer un contrôle intelligent permettant d'améliorer la productivité de la serre. 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:

$$\rho v_i \frac{dH_i}{dt} = F_v + C_{sat} (E + f_{og}) \quad (I.5)$$

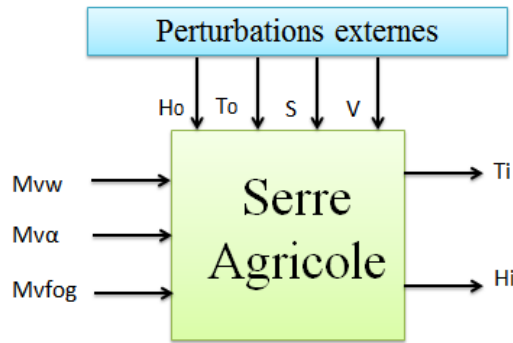
Avec  $\rho$  la densité de l'air ( $\text{kg}_{\text{air}} \text{m}^{-3}$ );  $v_i$  le volume de la serre ( $\text{m}^3$ );  $F_v$  le taux de l'eau dans l'air renouvelé ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{s}^{-1}$ );  $C_{sat}$  le coefficient de saturation de l'air;  $f_{og}$  est le taux de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

$$\rho v_i c_p \frac{dt_i}{dt} = Q_s - Q_{cc} + Q_m - C_{sat}(Q_e + Q_n) - Q_v + W \quad (I.6)$$

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.

$$A_i C_m \frac{dT_m}{dt} = Q_{sm} - Q_m - Q_f \quad (I.7)$$

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



**Figure I-6 :** modèle dynamique de la serre.

Le modèle d'entrée-sortie de la serre est décrit par la figure I.6 où les variables à commander sont  $T_i$  et  $H_i$ , à travers l'ajustage des variables suivantes:

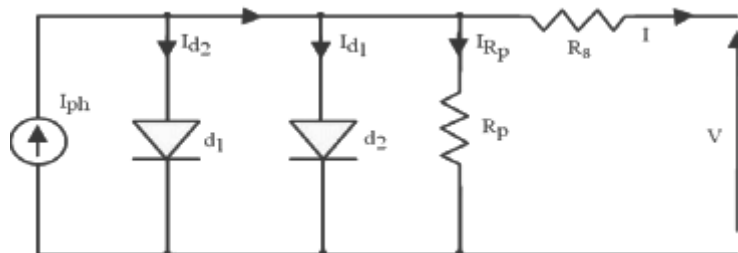
- ◆ Ouverture et fermeture des fenêtres ( $Mv\alpha$ ).
- ◆ Le système de chauffage ( $Mvw$ ).
- ◆ Le système de brouillard ( $Mvfog$ ).

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.
- ◆  $H_0$  l'humidité extérieure.

### I.7.2.2 Modélisation du module

Le modèle de la cellule solaire, considéré est celui décrit par la figure 2.2.



**Figure I-7:** 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 II.2, est donné par:

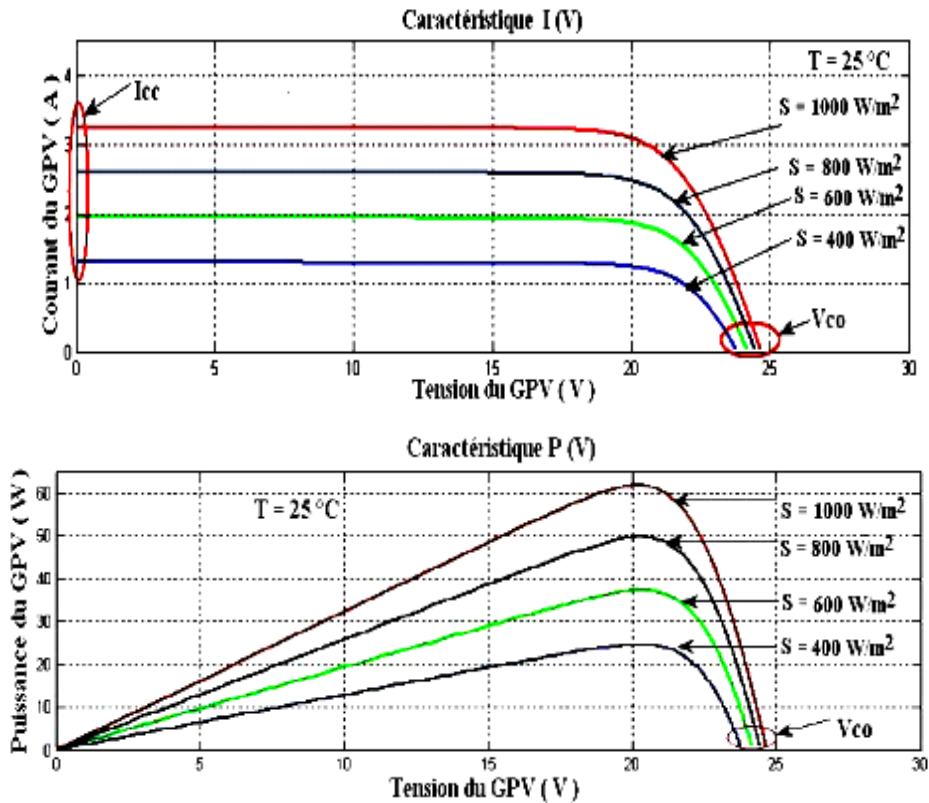
$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[ e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_1 Kt}} - 1 \right] - I_{d2} \left[ e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_2 Kt}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (I.8)$$

$I_{d1}$  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  $q$  ( $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$  C) et la constante de Boltzmann.  $k$  ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/ K). Le photo-courant  $I_{ph}$  est atteint à une insolation maximum. Souvent, nous avons ( $I_{ph} = S \times I_{phmax}$ ) avec  $S$  = pourcentage d'insolation. Il est évident, de l'équation (I-8), 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:

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T=298K) [1+(T-298) \cdot 5 \cdot 10^{-4}] \quad (I.9)$$

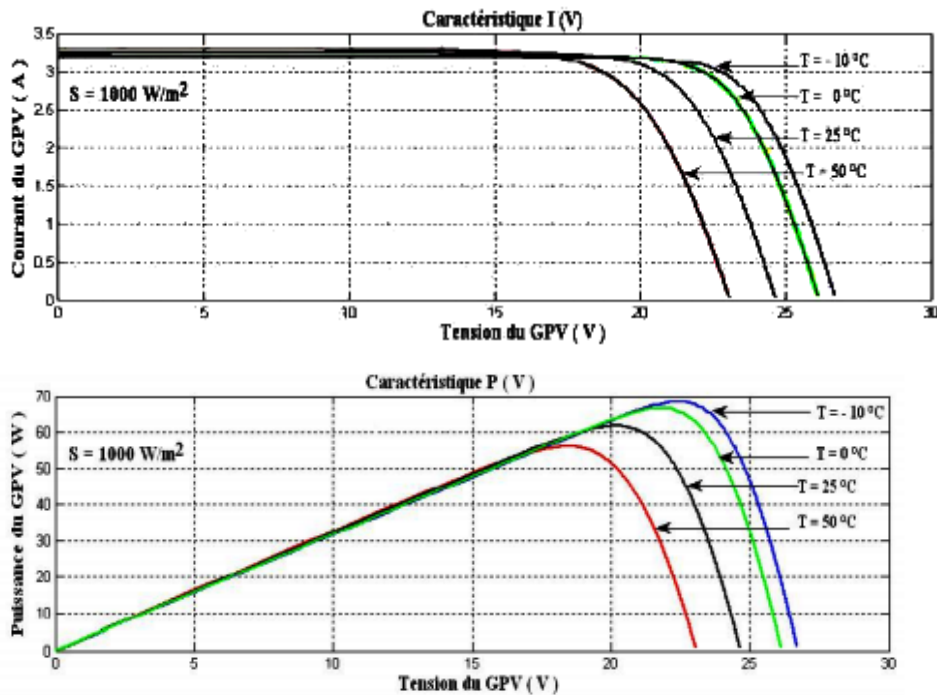
L'équation suivante montre le modèle mathématique d'un module photovoltaïque, avec  $N_r$  nombre des cellules photovoltaïques raccordés en série.

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.



**Figure I.8:** 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.



**Figure I-9 :** Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

### I.7.3 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, (Figure I-9). Elle est représentée par quatre blocs: a. Bloc de capacités b. Bloc de tensions c. Bloc de l'état de charge (SOC) d. Bloc des pertes par le courant de gazage.

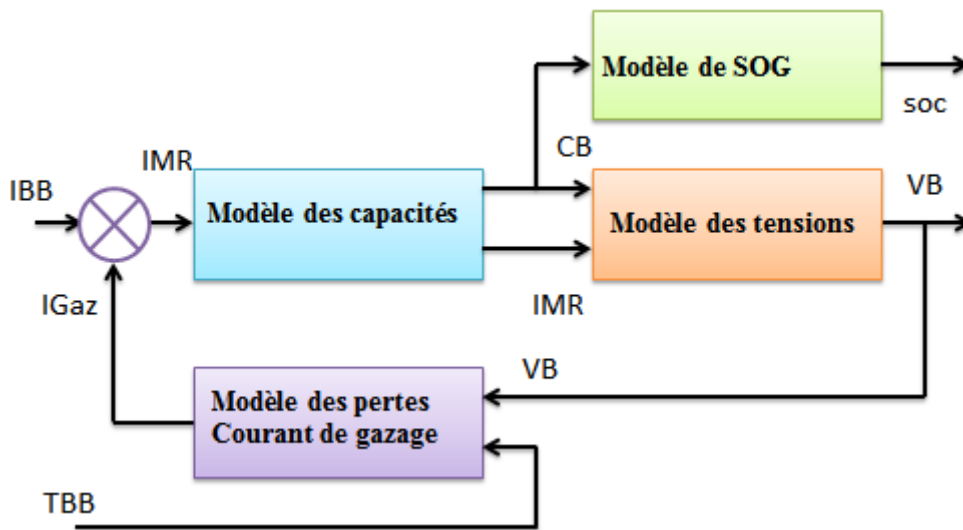


Figure I-10: Schéma bloc d'une batterie

$$I_{MR}(t) = I_{BB}(t) - I_{GAZ}(t) \quad (I.10)$$

$$CB(t) = \int_{t=0}^t I_{MR}(t) dt + c_{B,i} \quad (I.11)$$

$$I_{GAZ}(t) = \frac{C_{10}}{100} * I_{G0} * e^{[c_v(v_{ele}(t) - 2.23 + c_T(T_{BB}(t) - 20)]} \quad (I.12)$$

$I_{BB}$  : Courant de la batterie (A);  $I_{GAZ}$  : Courant de gazage de la batterie (A);  $CB(t)$  : 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:

$$\text{SOC}(t) = \frac{c_B(t)}{c_{10}} * 100\% \quad (\text{I.13})$$

**En charge:  $IBB > 0$** 

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

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

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

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

$$Q_{MAX}(I_{MR}(t)) = C_1 * I_{MR}(t)^3 + C_2 * I_{MR}(t)^2 + C_3 * I_{MR}(t) + C_4 \quad (\text{I.14})$$

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.

**En décharge:  $IBB < 0$** 

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

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

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

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

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  $A_D, C_D, D_D, EFD, D_1, D_2, D_3, D_4$  sont relatifs à la batterie.

**I.7.3.1 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.

## I.7.4 Convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

### I.7.4.1 Hacheur parallèle (Boost)

Le convertisseur Boost connu par le nom d'élévateur de tension - abaisseur de courant est représenté par la figure I.10. Il est caractérisé par son rapport cyclique  $d$  compris entre 0 et 1, qui donne les temps d'ouverture et de fermeture du transistor  $S$ .

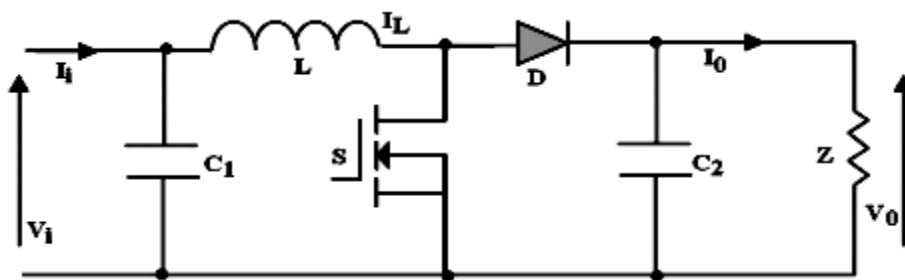


Figure I-11: Circuit électrique équivalent du convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement, (Figures. 11 et 12), donne:  $0 < t < d_{ts}$

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

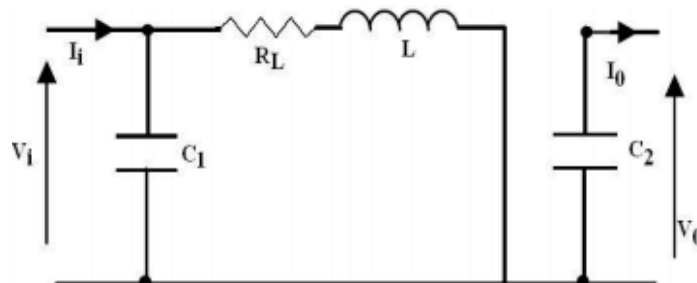


Figure I-12: Circuit équivalent du Boost, S fermé

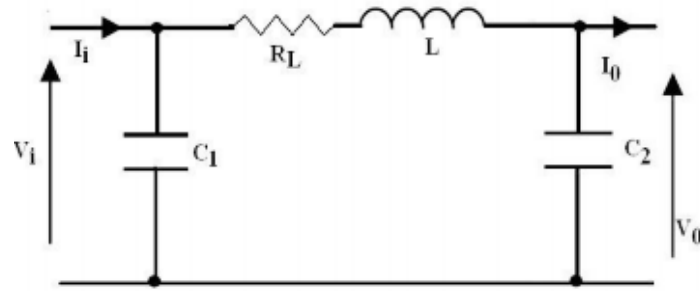


Figure I-13 : Circuit équivalent du Boost, S fermé

$dT_s < t < t_s$

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{C2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = i_L - i_0 \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_0 - R_L i_L \end{cases} \quad (\text{I-17})$$

### I.7.5 Systèmes MPPT

Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique  $I = f(U)$  est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, 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. 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).

## **I.8 Conclusion**

Le choix d'une structure de serre, des équipements et de la conduite climatique est le maillon clé de la qualité de la serre-culture. Dans ce chapitre nous avons vu les types de serres agricoles les plus populaires, ensuite nous avons défini les différents composants nécessaires à la gestion efficace des paramètres climatiques sous serre. Enfin nous avons déterminé les paramètres les plus agissants sur la croissance de la culture sous serre. L'amélioration de la gestion du climat repose sur une meilleure connaissance de la physiologie des plantes afin de déterminer ses besoins et les répercussions de l'environnement sur le fonctionnement de la culture.

Les systèmes autonomes dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. L'énergie produite par les modules photovoltaïques au cours de la journée peut être utilisée immédiatement ou emmagasinée dans les accumulateurs, servant la nuit ou pendant des périodes à ciel couvert où dans le cas insuffisance d'énergie solaire pour alimenter la serre agricole.

# Chapitre II

---

Les techniques de contrôle  
et de commande de la gestion  
climatique des serres agricoles

## II.1 Introduction

Le principe d'un système de commande de rétroaction de base, est de maintenir la sortie d'un processus connu sous le nom de «variable commandée» à un niveau souhaité appelé signal de référence ou de consigne. En fonction des types et des exigences du système de commande, différents contrôleurs sont nécessaires pour contrôler de tels processus allant des régulateurs tout ou rien (Edgar, Seborg, & Mellichamp, 2004; Visioli, 2006), à des variations de contrôleurs proportionnels-intégrales-dérivées (PID) (Åström & Murray, 2009; Visioli, 2006), jusqu'aux contrôleurs adaptatifs optimaux (Åström & Wittenmark, 1995).

Ces outils ont été largement utilisés dans la conception de nombreux systèmes de contrôle intelligents.

## II.2 Techniques de contrôles

En général, le contrôle intelligent se dote de diverses techniques et outils pour concevoir des contrôleurs intelligents. Les outils sont communément appelés soft computing et intelligence computationnelle (Eberhart & Shi, 2007; Engelbrecht, 2007; Rutkowski, 2008; Shin & Xu, 2009; Zilouchian & Jamshidi, 2001), et les exemples principaux, largement utilisés sont énumérés ci-dessous:

- 1- Logique floue (FL).
- 2- Réseaux de neurones artificiels (RNA).
- 3- Algorithmes d'évolution (EAs).

### II.2.1 Contrôle Classique :

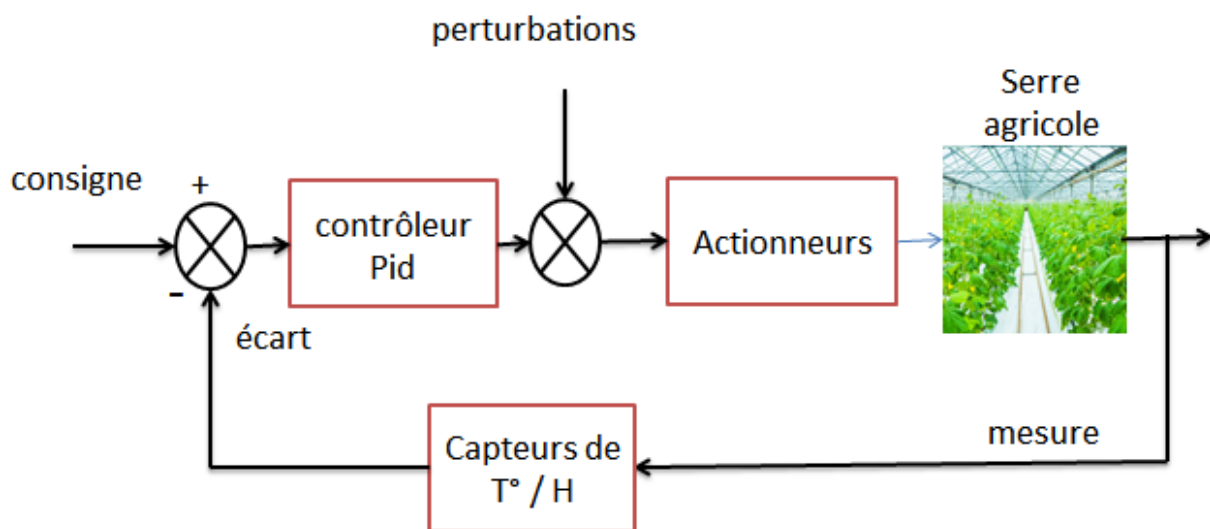
Dans le contrôle classique, les systèmes à contrôler sont considérés comme des systèmes d'entrée-sortie. Les entrées sont généralement des entrées de commande et des perturbations, tandis que les sorties sont généralement les variables à contrôler. Dans l'environnement de la serre, les entrées de contrôle peuvent être la quantité de chauffage, la vitesse de ventilation (ouverture des vitres, vitesse des ventilateurs), la quantité d'éclairage supplémentaire, La position de l'écran et le taux d'enrichissement en CO<sub>2</sub>. La température extérieure et l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement solaire, et la concentration en CO<sub>2</sub> sont considérés comme des perturbations.

La technique de contrôle conventionnelle la plus utilisée dans les systèmes de culture en serre est le contrôle par rétroaction. Le régulateur est souvent du type simple ON / OFF ou du type de dérivation proportionnelle-intégrale (PID).

## II.2.2 Le régulateur PID :

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID, est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie ou ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

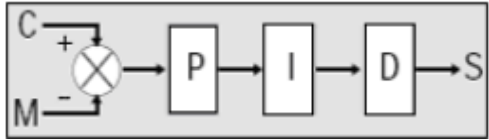
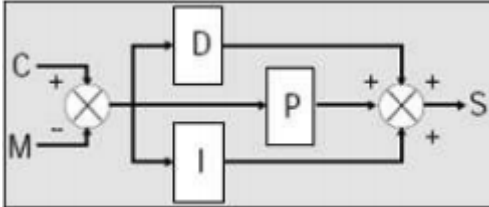
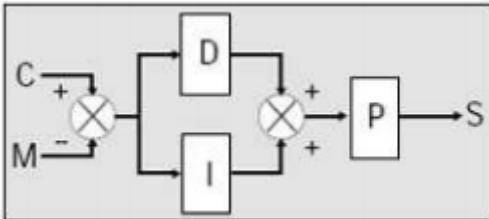
L'action conjuguée **PID** permet une régulation optimale en associant les avantages de chaque action : la composante **P** réagit à l'apparition d'un écart de réglage, la composante **D** s'oppose aux variations de la grandeur réglée et stabilise la boucle de régulation et la composante **I** élimine l'erreur statique. Ce type de correcteur est le plus utilisé en milieu industriel.



**Figure II-1 :** Structure du contrôleur PID adaptatif.

Ce type de correcteur est le plus utilisé en milieu industriel. Dans un régulateur PID, il existe plusieurs façons d'associer les paramètres P, I et D. En effet, le correcteur PID peut avoir une structure série, parallèle ou mixte. Le tableau suivant donne les différentes structures du régulateur PID

**Tableau II.1 :** Différentes structures du régulateur PID

Structure du régulateur PID	Schéma et fonction de transfert
Série	 $C(p) = G_r \left(1 + \frac{1}{T_{ip}}\right) \left(1 + \frac{1}{T_{dp}}\right)$
Parallèle	 $C(p) = G_r + \frac{1}{T_{ip}} + T_{dp}$
Mixte	 $C(p) = G_r \left(1 + \frac{1}{T_{ip}} + T_{dp}\right)$

### II.2.3 La régulation par logique floue:

**Historique** les prémisses de la logique floue ont été introduites en 1965 par l'automaticien L.A Zadeh. Professeur à l'université de Berkely en Californie a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier aux limites due aux incertitudes des modèles classiques à l'équation différentielle. En 1975, M Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadah sur une chaudière à vapeur, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Les éléments de bases de cette logique sont :

- Les variables linguistiques.
- Leurs définitions par des fonctions d'appartenance.
- La déduction floue ou inférence.
- Les opérateurs de la logique floue.

#### II.2.3.1 Notion de commande floue

La description d'un phénomène, d'une situation ou d'un procédé contient en générale des expressions floues comme : quelques, beaucoup, souvent, ....., ces expressions forment les

valeurs des variables linguistiques de la logique floue. Par exemple, les termes « jeune », « âgé », « entre deux âges » formant des ensembles flous, peuvent être considérés les valeurs d'une variable linguistique « âge ».

#### a) Description d'un procédé :

La commande d'un processus industriel par la logique floue se repose essentiellement sur la description que l'on fait d'un procédé. En vue d'un traitement par série d'instructions, cette description sera mise sous la forme :

**SI** condition1 **ALORS** operation1, **OU**

**SI** condition2 **ALORS** operation2, **ET**

**SI** condition n **ALORS** opération n

La formulation de la description nécessitera beaucoup d'expériences de la part de l'opérateur.

#### b) Fonction d'appartenance

On attribue à chaque valeur de la variable linguistique des fonctions d'appartenance, dont la valeur varie entre 1 et 0, en tenant compte de la classification en un certain nombre d'ensemble flou. C'est la fuzzification.

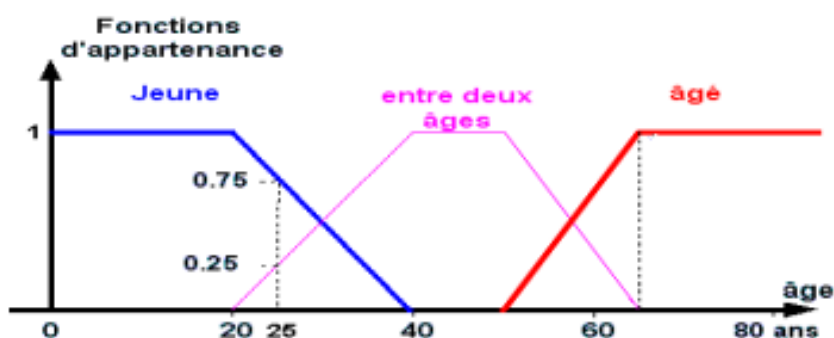
Une fonction d'appartenance est notée :  $\mu_E(x)$ .

Où : x est la variable linguistique et E l'ensemble flou concerné.

Mais on peut omettre soit l'argument, soit l'indice, ou les deux s'il n'y a pas de confusion.

Une valeur précise de la fonction d'appartenance, liée à une valeur déterminée de la variable x est dite facteur d'appartenance.

La notion de fonction d'appartenance permet de donner un coefficient de confiance à l'affirmation «x appartient à l'ensemble A ». par exemple, les fonctions d'appartenance représentant la variable linguistique « âge » peut être représenté par la figure ci-dessous.



**Figure II-2 :** Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.

Ainsi, une personne de 25ans, aura un facteur d'appartenance  $\mu=0.75$  à l'ensemble « jeune » et  $\mu= 0.25$  à l'ensemble « entre deux âges ».

### II.2.3.2 Les opérateurs de la logique floue :

Pour réaliser la déduction floue ou inférence, les variables linguistiques sont reliés entre elles par des opérateurs qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables

#### a) Opérateur NON (complément, négation, inverse) :

C'est l'ensemble complémentaire de la théorie des ensembles.

$$C = \bar{A} = \text{Non} (A) \quad (\text{II.1})$$

On peut l'exprimer par les fonctions d'appartenances de la manière suivante :

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.2})$$

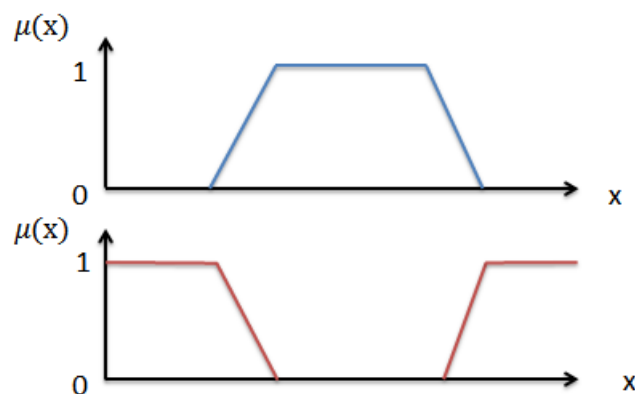


Figure II-3: Opérateur NON.

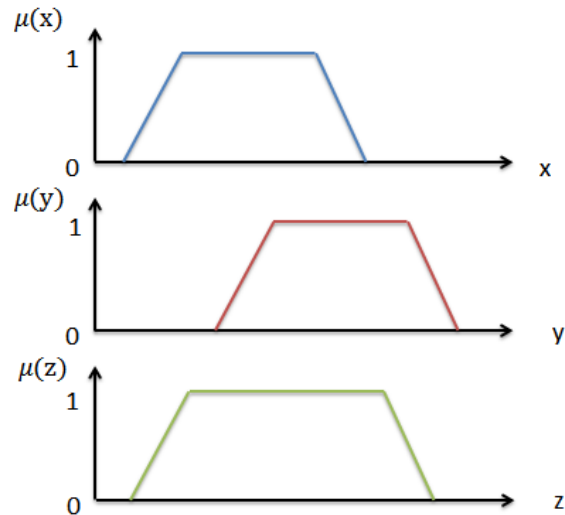
#### b) Operateur OU (maximum) :

C'est la réunion de deux ensembles.

$$C = A \cup B = A \text{ OU } B \quad (\text{II.3})$$

La réalisation de l'opérateur « OU » au niveau de la logique floue se fait en général par la fonction du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(y)$  des deux ensemble A et B. on a donc l'opérateur maximum.

$$\mu_c(Z) = \mu_{A \text{ OU } B}(Z) = \max [\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (\text{II.4})$$



**Figure II-4 : Operateur OU.**

Il faut remarquer qu'il est possible que la fonction d'appartenance résultante  $\mu_C(z)$  atteigne deux fois la valeur. L'opérateur maximum est commutatif et associatif.

**c) Opérateur ET (minimum) :**

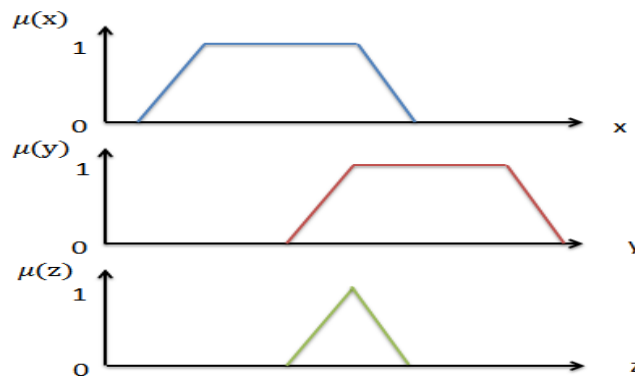
L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensembles A et B, et on écrit :

$$C = A \cap B + A \text{ ET } B \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas de la logique floue, l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(y)$  des deux ensembles A et B.

$$\mu_C(Z) = \mu_{A \text{ ET } B}(Z) = \min [\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (\text{II.6})$$

L'opérateur minimum est commutatif et associatif.



**Figure II-5: Operateur ET.**

Il est possible que la fonction d'appartenance résultante n'atteigne pas la valeur 1. Ces opérateurs sont les plus utilisés pour le réglage par la logique floue, cependant, on peut utiliser d'autres réalisations.

Ces opérateurs soit pour s'simplifier le traitement numérique, soit pour mieux tenir compte des opérations floues

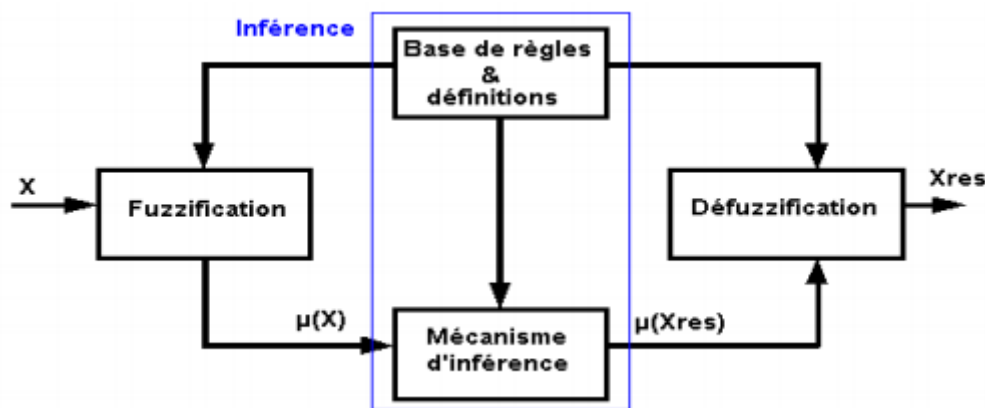
### II.2.3.3 Inférence à plusieurs règles :

Le cas d'une inférence avec plusieurs règles se présente essentiellement pour des problèmes de réglage et de commande par logique floue, dans lesquelles, une ou plusieurs variables linguistiques nécessitent une prise de décision suivant les valeurs qu'atteignent ces variables. Les règles peuvent alors être exprimées sous la forme générale.

Conception d'un régulateur par logique floue

Par opposition à un régulateur standard, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. Un régulateur par logique floue est constitué de trois parties :

- Fuzzification
- Inférence
- Défuzzification.



**Figure II-6:** Structure interne d'un régulateur par logique floue.

#### a) Fuzzification :

La fuzzification consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les variables du système (variables d'entrée et variables de sortie). On réalise ainsi, le passage des grandeurs physiques en variables linguistiques qui peuvent alors être traitées par des inférences.

#### b) Bases de règles et inférences :

Comme on a vu dans le paragraphe précédent, on utilise des inférences avec plusieurs règles pour le réglage par logique floue. La description des règles d'inférences est alors une étape très importante. Il existe plusieurs manières d'exprimer les inférences, mais les plus pratiques sont la description par matrice d'inférences.

### c) Défuzzification :

La Défuzzification consiste à la transformation de l'information floue fournit par les inférences en une information déterminée pour la commande. Cela veut dire qu'il faut extraire une valeur réelle  $y_0$  à partir de la fonction d'appartenance  $\mu(y)$  du sous-ensemble de sortie. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification mais les plus utilisés sont :

- La défuzzification par centre de gravité.
- La défuzzification par valeur maximale.
- La défuzzification par centre de gravité.

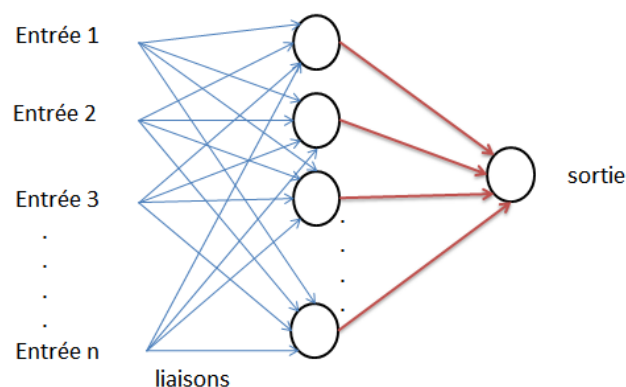
### II.2.4 Réseaux de neurones feedforward :

Rosenblatt (Rosenblatt, 1958) a inventé le nom de perceptron pour les réseaux multicouches (MLP) qui ont attirés beaucoup d'attention. Les réseaux feedforward MLP se composent d'au moins trois couches nommées entrée, sortie et cachée (figure 3.7). Mathématiquement, le fonctionnement d'un MLP pourrait être représenté par:

$$F_k(x) = \sum_{i=1}^N w_{kj} * \rho(\sum_{i=1}^p W_{ji} X_{ji} + B_j) + B_k \quad (\text{II.7})$$

Où :

$F_k(x)$  Est la  $k^{\text{ème}}$  sortie du réseau,  $X$  est la  $i^{\text{ème}}$  entrée,  $\rho$  est le nombre d'unités d'entrée,  $N$  est le nombre d'unités cachées,  $w_{ji}$  est le poids entre les couches d'entrée et cachées,  $w_{kj}$  est le poids entre les couches cachées et de sortie,  $B_j$  est le biais sur la couche cachée,  $B_k$  Est le biais sur la couche de sortie et  $\rho$  Est la fonction d'activation.



**Figure II-7:** Représentation schématique d'un réseau neuronal feedforward.

#### II.2.4.1 Apprentissage des réseaux neuronaux :

Il s'agit là de deux phases, la phase d'apprentissage et la phase de rappel qui sont utilisées pour construire un réseau neuronal particulier. Il se compose de deux segments

d'apprentissage, l'un structurel et l'autre paramétrique. Un réseau neuronal représente fondamentalement une base de connaissances statiques. Certaines caractéristiques importantes ont été ajoutées au réseau neuronal traditionnel pour fournir des systèmes connexionnistes évolutifs. Ces caractéristiques sont l'apprentissage en ligne par l'adaptation à la base de connaissances et l'apprentissage progressif. Les programmes d'apprentissage dans les réseaux de neurones peuvent être classés en trois catégories : supervisées, renforcées et non supervisées.

#### II.2.4.2 Apprentissage supervisée :

Un système doit être dirigé par un signal externe pour obtenir une performance souhaitée. Le plan BP d'erreur, est basée sur la méthode de descente la plus abrupte. L'inconvénient majeur de cette méthode est sa vitesse lente d'apprentissage et le problème minimum local qui le rend impropre à une application en temps réel.

$$\Delta w_{ij}(k+1) = -\zeta * \frac{\partial E_{(k+1)}}{\partial \Delta w_{ij}(k+1)} + \mu * \Delta w_{ij}(k) \quad (\text{II.8})$$

ce schéma peut parfois stabiliser et accélérer la convergence du réseau dans la formation. Un certain nombre de techniques puissantes de second ordre ont également été proposées pour accélérer la MLP comme il est mentionné précédemment. L'algorithme BP avec ces modifications a été utilisé avec succès dans de nombreux réseaux.

Où :

$$E = \frac{1}{2} (y_d - y)^2 \quad (\text{II.9})$$

Telque :

$y_d$  et  $y$  Sont les sorties souhaitées et réelles du réseau, Et  $\zeta$  et  $\mu$  sont respectivement le taux d'apprentissage et le coefficient de momentum.

#### II.2.4.3 Apprentissage par renforcement :

Un programme d'apprentissage par renforcement se réfère essentiellement au concept selon lequel si une réponse satisfaisante d'un système est obtenue, l'action qui a produit cette réponse doit être récompensée. Inversement, si la réponse due à une certaine action n'est pas satisfaisante, l'action doit être pénalisée. Les programmes d'apprentissage supervisé et de renforcement sont dirigés par un agent externe. Ces schémas sont fonctionnellement semblables. Cependant, ils ont des forces d'information différentes. Dans le cas de

l'apprentissage par renforcement, les informations de rétroaction ne fournissent qu'un signal de rétroaction évaluative (signal de renforcement), Tandis que dans le cas de l'apprentissage supervisé, un signal de retour précis est fourni au système d'apprentissage.

#### II.1.4.1 Apprentissage non supervisé

Contrairement au programme d'apprentissage supervisé, un algorithme d'apprentissage non supervisé ne nécessite essentiellement aucun signal externe, il est donc couramment utilisé dans les systèmes d'apprentissage compétitifs. Des systèmes d'apprentissage compétitifs sont normalement utilisés pour le regroupement de motifs.

#### II.2.4.2 Applications des réseaux neuronaux feedforward

Les principaux domaines d'application sont l'analyse statistique, en particulier l'extraction de données et de textes, analyse / contrôle des procédés industriels, télécommunications et applications médicales / biologiques. Parmi ces applications, la zone d'identification et de contrôle des systèmes dynamiques est très prometteuse.

1. Modélisation de la réponse dynamique du PH dans un réacteur à cuve agitée
2. Approximation fonctionnelle.
3. Identification et contrôle d'une colonne de distillation.
4. Contrôle de la température du traitement thermique rapide.
5. Contrôle du traitement de l'eau.

### II.3 Avantages et inconvénients de la logique floue et des réseaux de neurones

L'utilisation simultanée des réseaux de neurones et de la logique floue, permet de tirer les avantages des deux méthodes : les capacités d'apprentissage de la première et la lisibilité et la souplesse de la seconde. Afin de résumer l'apport du neurone-flou, le Tableau (3.2) regroupe les avantages et les inconvénients de la logique floue et des réseaux de neurones. Tableau

**Tableau II.2:** Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurones

Réseaux de neurones	Logique flou
<b>avantages</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le modèle mathématique non requis.</li> <li>• Aucune connaissance basée sur les règles.</li> <li>• Plusieurs algorithmes d'apprentissage sont disponibles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le modèle mathématique non requis.</li> <li>• La connaissance antérieure sur les règles peut être utilisée.</li> <li>• Une interprétation et implémentation simple</li> </ul>

<b>inconvénients</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boite noire (manque de traçabilité)</li> <li>• L'adaptation aux environnements différents est difficile et l'apprentissage est souvent obligatoire.</li> <li>• La connaissance antérieure ne peut pas être employée (apprentissage parti de zéro)</li> <li>• Aucune garantie sur la convergence de l'apprentissage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les règles doivent être disponibles.</li> <li>• Ne peut pas apprendre</li> <li>• Adaptation difficile au changement de l'environnement.</li> <li>• Aucune méthode formelle pour l'ajustement.</li> </ul>

#### **II.4 Algorithmes génétiques**

La méthode de l'algorithme génétique (GA) est une technique de recherche globale basée sur une analogie avec la biologie dans laquelle un groupe de solutions évolue à travers la sélection naturelle et la survie du plus apte (Goldberg, 1989). La méthode GA représente chaque solution par une chaîne de bits binaire ou directement dans sa valeur réelle. Une telle chaîne est constituée de sous-chaînes, chaque sous-chaîne représentant un paramètre différent. Dans la terminologie des AG, les bits sont appelés «gènes» et la chaîne totale comme un «chromosome». Plusieurs chromosomes représentant les différentes solutions comprennent une «population». Cette méthode n'est pas basé sur le gradient, elle utilise un échantillonnage implicitement parallèle dans l'espace de la solution. L'approche populationnelle et l'échantillonnage multiple signifie qu'il est moins sujet au piège dans l'optima local, et que les techniques d'optimisation traditionnelles explorent un grand espace dans la solution. L'algorithme génétique est puissant pour atteindre une solution optimale ou très proche de l'optimale.

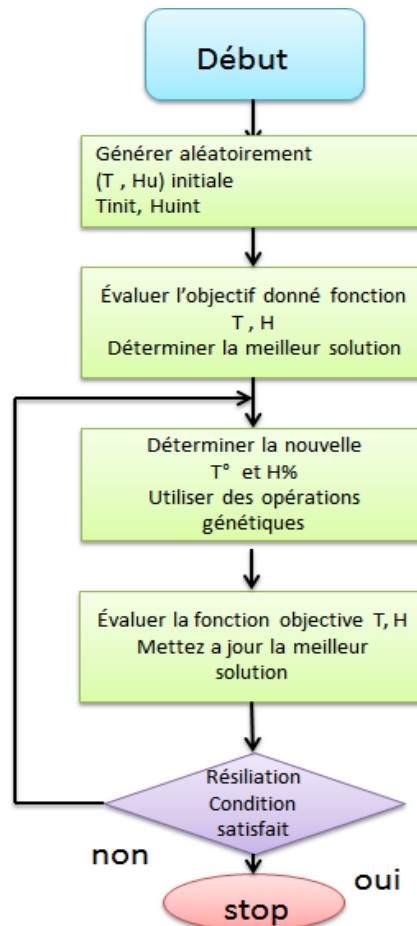


Figure II-8 : Organigramme d'algorithme génétique

### II.5 Principales attractions des algorithmes génétiques

Les principales attractions des GA énumérés dans (Reeves, 1995; Khalifa, 1997) sont indépendants du domaine, la non linéarité, la robustesse, la facilité de modification, et la multi objectivités.

1) L'indépendance du domaine : Les GAs travaillent sur un codage d'un problème, de sorte qu'il est facile d'écrire un programme informatique général pour résoudre les nombreux problèmes d'optimisation différents.

2) Non linéarité : De nombreuses méthodes d'optimisation classiques dépendent d'une hypothèse restrictive pour l'espace de recherche, par exemple la linéarité, la continuité, la convexité, la différentiabilité, etc. Aucune de ces limitations n'est nécessaire pour les AG.

La seule exigence est la capacité de calculer dans une certaine mesure la performance, qui peut être complexe et non linéaire.

3) Robustesse : En conséquence des deux propriétés énumérées ci-dessus, les AGs sont Intrinsicquement robustes. Ils peuvent faire face à une diversité de types de problèmes; ils ne

travaillent pas seulement les fonctions hautement non linéaires, mais plutôt ils les traitent d'une manière très efficace. De plus, les données empiriques montrent que, bien qu'il soit possible d'affiner une AG pour mieux travailler sur un problème donné, il est néanmoins vrai qu'un large éventail de réglages de paramètres GA (sélection critère, taille de la population, taux de croisement et de mutation, etc.) donnera des résultats acceptables.

4) Facilité de modification: Même des modifications relativement mineures d'un problème particulier peuvent causer des difficultés importantes à de nombreuses méthodes heuristiques. En revanche, il est facile de changer un AG pour modéliser les variables initiales du problème.

5) Multi-objectivités: Une des caractéristiques les plus importantes des AG ; c'est qu'ils peuvent fournir la multi- objectivités de la fonction de conditionnement physique qui peut être formulée pour optimiser plus d'un seul critère. De plus, les GA sont très flexibles dans le choix d'une fonction objective. Ces caractéristiques donnent aux GAs la capacité de résoudre de nombreux problèmes complexes dans le monde du réel.

## **II.6 Conclusion**

Il est possible d'associer des chaînes de régulation dans le but d'améliorer la performance des boucles ou d'asservir des grandeurs réglées les unes aux autres. Les techniques les plus utilisées dans ce cas notamment la régulation en cascade et la régulation proportion.

Les techniques récentes utilisant les procédés et les algorithmes modernes de commande.

Les nouvelles possibilités apportées par les systèmes numériques de commande permettent de mettre en œuvre des procédés et des algorithmes modernes en vue de la commande performante des processus à grand retard pur.

# Chapitre III

---

## **Dimensionnement et optimisation énergétique du système photovoltaïque**

### **III.1 Introduction**

La production d'électricité avec un système PV relié représente un grand intérêt pour les pays en développement et notamment pour les régions qui en souffrent de la qualité du service du réseau électrique. Afin de mieux exploiter une source d'énergie renouvelable et d'optimiser la collecte de rayonnement par les capteurs photovoltaïques, le système photovoltaïque doit être donc correctement dimensionné. Dans ce contexte, nous allons étudier de conception constitue une contribution pour intégrer des sources d'énergie renouvelable dans notre vie quotidienne, notamment dans la région des hauts plateaux où est enregistré ces dernières années une dégradation frappante de la qualité de service du réseau électrique.

Pour concrétiser notre travail. Nous avons choisi comme exemple d'application, le dimensionnement et l'optimisation d'une centrale photovoltaïque pour alimenter la future serre agricole d'Elmohgoun ARZEW wilaya d'Oran.

Étant donné qu'un tel projet exige une méthodologie très compétente de conception et de dimensionnement de la source d'énergie photovoltaïque et l'optimisation de la consommation de l'énergie électrique pour réduction du coût de l'investissement. Pour cela et en plus de notre travail sur l'organigramme de conception, nous nous sommes intéressés à la régulation des différents sous-systèmes de l'installation de production et environnement interne.

Nous achèverons cette partie par l'utilisation d'un logiciel de conception des centrales photovoltaïques pour retenir la configuration optimale, valider les résultats de dimensionnement et confirmer le fonctionnement du générateur photovoltaïque conçu.

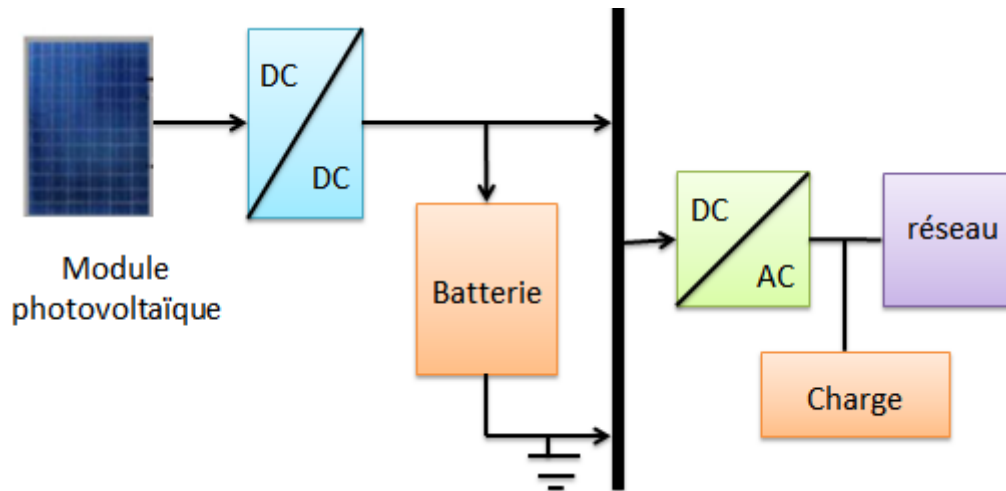
### **III.2 Dimensionnement d'un système photovoltaïque**

Le dimensionnement d'un champ photovoltaïque est un art difficile dans la mesure où il nécessite beaucoup des compétences et des disciplines. Le travail consiste à élaborer un dimensionnement des installations de la centrale, en prenant en considération tous les paramètres, en gardant aussi le même choix de l'entreprise en ce qui concerne les types des équipements. Le choix des paramètres de projet dépend de la taille du champ photovoltaïque, lui-même déterminé par la puissance de consommation.

#### **III.2.1 Norme et conception**

Un système photovoltaïque doit être conçu pour permettre une installation dans des conditions de sécurité optimale. Ainsi, lors de la conception et de l'installation, tous les dangers potentiels pendant et après la phase d'installation doivent être pris en considération. La conception d'un chantier PV est dictée par le guide UTE C15-712 « Installations

Photovoltaïques ». Or ce document donne les règles imposées pour le dimensionnement des câbles ainsi que le choix des organes de protection. La figure(4.1) présente le schéma de principe général d'une installation PV.



**Figure III-1** : Schéma général d'une installation PV.

### III.2.2 Algorithme de la méthodologie de conception

En générale la méthodologie de dimensionnement d'un système photovoltaïque dépend d'un algorithme général. Néanmoins chaque concepteur doit tracer un algorithme propre qui dépend de la nature du système à dimensionner, des relations fonctionnelles entre les composants du système, des influences externes, et la technologie des appareillages de ce dernier. Les différentes étapes de l'algorithme de cette méthodologie sont présentées ci-dessous.

**Étape 1** : Présentation du site et évaluation de la ressource solaire Cette phase initiale est consacrée à la présentation et détermination des coordonnées géographiques, astronomique et météorologiques du site. Les données climatologiques consiste a vérifié que le site ne pose pas de contraintes d'implantation du système photovoltaïque (ombrage, accès difficile au site, etc.). Un recueil des données climatiques tel que l'ensoleillement minimal journalier, les températures ambiantes moyennes et extrêmes en °C et la latitude du lieu doit être accompli. Lorsque l'ensoleillement est important et la température moyenne est tolérable, plus le site sera propice à l'exploitation du photovoltaïque. Quoique, les données géographique et astronomique déterminent la position optimale des panneaux pour obtenir une bonne puissance.

**Étape 2 :** Déterminer la consommation électrique totale C'est une phase qui concerne à la détermination des besoins de l'utilisateur en énergie électrique quelques soient les conditions. Elle peut être limitée suivant la consommation du client ou bien calculée pour avoir un surplus pour l'injecté dans le réseau.

**Étape 3 :** Définir le type de système à installer Le concepteur doit savoir le type du système à dimensionner comme cela a été expliqué dans le chapitre I (système raccordé au réseau, système autonome ou système hybride). L'installation choisie dans ce projet représente un système raccordé au réseau avec stockage pour suffire les besoins de l'entreprise et produire un surplus d'énergie a injecté dans le réseau.

**Étape 4 :** Déterminer la puissance crête pour l'installation. Bien que cette phase exige la détermination de la technologie du panneau. La puissance crête est la puissance que doit fournir l'ensemble des modules photovoltaïques pour couvrir les besoins en énergie électrique déterminés dans l'étape 2.

**Étape 5 :** Dimensionnement du stockage La batterie occupe une place importante dans un système photovoltaïque car, elle stocke l'énergie et la restitue lorsque l'application le nécessite. Il est donc sérieux de bien déterminer sa taille et sa capacité à partir des paramètres de l'installation et de la technologie de la batterie.

**Étape 6 :** Dimensionnement du régulateur de batterie Le régulateur protège la batterie contre la surcharge et la décharge profonde engendrée par le consommateur. Le concepteur doit connaître les paramètres, le type et la technologie du régulateur choisi.

**Étape 7 :** Dimensionnement des convertisseurs L'onduleur présente le maillon très fort pour les installations raccordées au réseau. Le choix de l'onduleur se fait sur la base des paramètres (tension, courants et puissance) côté générateur photovoltaïque et les grandeurs côté réseau. Bien que la technologie, le rendement et la fréquence de réseau symbolisent des données catalogue pour ce matériel.

**Étape 8 :** Câblage et protections Le choix des types de câbles électriques nécessaires à l'interconnexion des composants doit être entrepris de façon efficace pour maintenir la fiabilité et le bon rendement du système. Le calcul des courants d'emplois et les courants admissibles en tenant compte des facteurs influant sur la pose des câbles et l'utilisation des fiches techniques normalisés sont proposés pour déterminer la bonne section de câble. En général, les fils conducteurs de ces systèmes sont en cuivre et dimensionnés pour produire au maximum 3% de perte en tension dans le câblage.

### III.3 Présentation du site et évaluation de la ressource solaire

Le système PV doit permettre d'alimenter la serre agricole avec tous leurs accessoires. Alors avec ce générateur les besoins en consommation d'énergie électrique de la serre seront gratuits.

#### III.3.1 Coordonnées géographiques du site

Pour concrétiser notre travail. Nous avons choisi comme exemple d'application, le dimensionnement et l'optimisation d'une centrale photovoltaïque pour alimenter la future serre agricole d'Elmohgoun ARZEW wilaya d'Oran. L'accès à la serre se fera depuis la route d'elmohgoun vers arzew

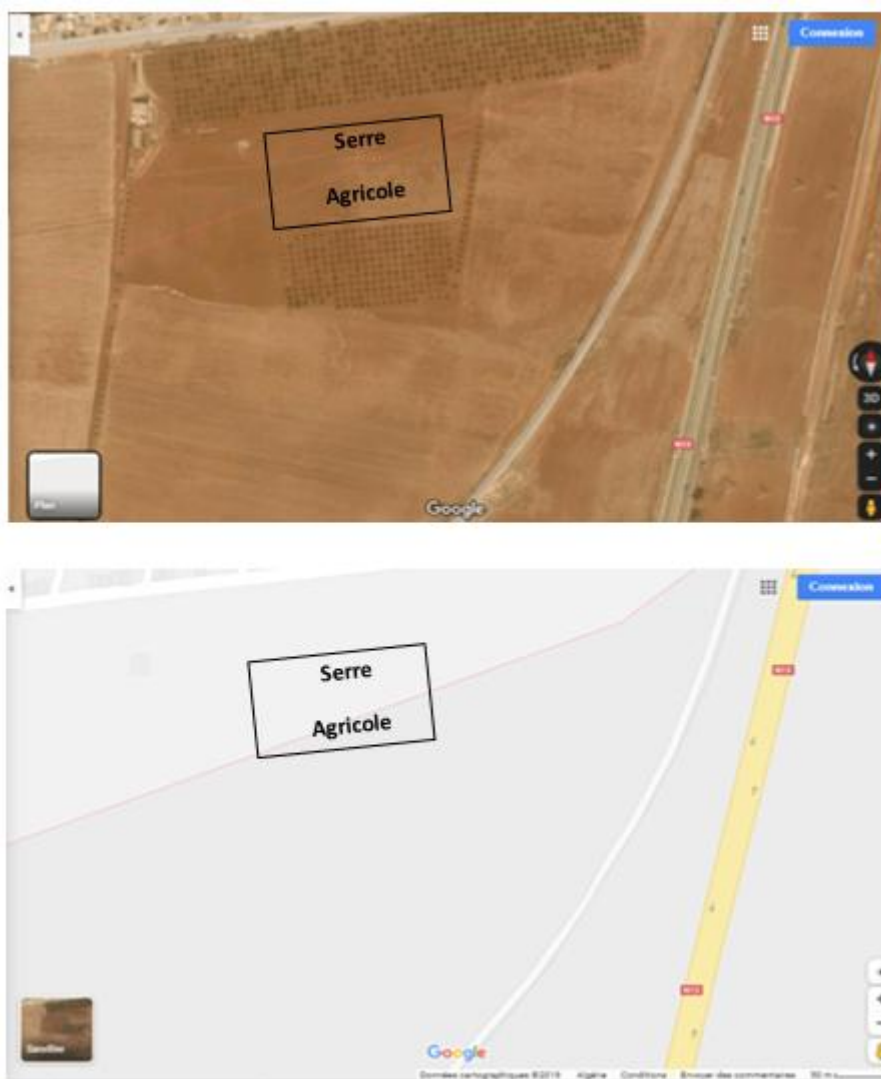


Figure III-2. : Vue du site par satellite (Google Earth)

### III.3.2 Estimation d'une serre agricole semi-fermée :

Exactement le site proposé de la serre agricole, situer aarzewa côté du chemin de fer de longitude :  $-0.36^\circ$  et d'attitude :  $35.81^\circ$ .



Figure III-3 : coordonnées du site proposé par satellite.

### III.3.3 Exploitation des logiciels :

Pour la simulation de la serre agricole, et estimer les résultats, nous avons exploité deux logiciels, qui sont différents, le premier c'est Hortinergy.

#### III.3.3.1 Logiciel Hortinergy :

Hortinergy est un logiciel en ligne de conception de serre agricole. Il modélise le climat et les consommations énergétiques de serre partout dans le monde. Il vous permet d'optimiser le climat et les performances énergétiques de votre projet de serres.

Hortinergy vous donne la possibilité de :

- Comparer les différentes solutions techniques disponibles pour votre projet.
- Trouvez la configuration optimale en fonction de vos besoins.
- Réduire durablement vos coûts énergétiques.

### III.3.3.2 Les dimensions de la serre :

**Project name :** serre agricole elmohgounear

<b>Scenario :</b>	sarre agricole
<b>Site:</b>	
Latitude [°] =	35.81
Longitude [°] =	-0.35
Altitude [m] =	51

Version: 2.1

#### A. Project parameters

##### 1. Greenhouse design

<b>Length (m)</b>	100
<b>Span – chapel width (m)</b>	9.6
<b>Width (m)</b>	96
<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>	9 600
<b>Roof height (m)</b>	7.8
<b>Gutter height (m)</b>	7
<b>Greenhouse type</b>	saw tooth

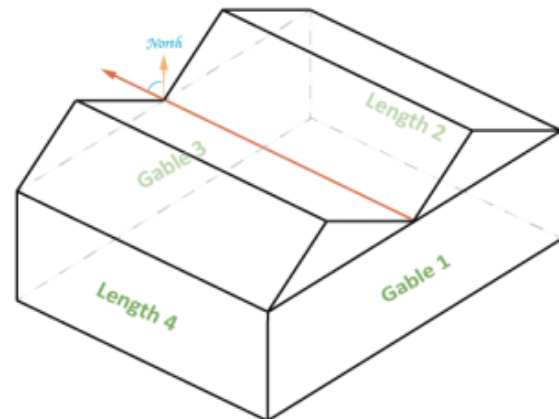


Figure III-4 : simulation des dimensions de la serre

**Production :**

##### 2. Crop production

<b>Type of crop</b>	Tomato
<b>Cultivation starting date</b>	2020-12-05
<b>End of cultivation</b>	2021-11-15
<b>Seedling age</b>	4 weeks at transplantation

### III.3.4 Données météorologiques

La conception des systèmes photovoltaïques nécessite la connaissance du rayonnement solaire utile sur le site d'installation. Cette connaissance est un des paramètres essentiels de l'étude préalable dans le plan des panneaux solaires. Pour un besoin électrique donné, plus l'énergie solaire reçue est grande, moins on a des panneaux solaires à installer et inversement. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé au sol. L'influence de l'atmosphère provoque la diffusion et l'absorption d'une partie du rayonnement incident. La modification par l'atmosphère du rayonnement solaire obéit à des phénomènes assez complexes et surtout en grande partie aléatoires. Le flux lumineux reçu au niveau du sol à un

instant donné dépend d'un grand nombre de paramètres tels que le gaz présents dans l'atmosphère, les nuages, Albédo, la température ambiante, le vent, l'Humidité relative, etc.

La radiation solaire moyenne journalière de la région tourne autour de  $5.25 \text{ Kwh/m}^2$

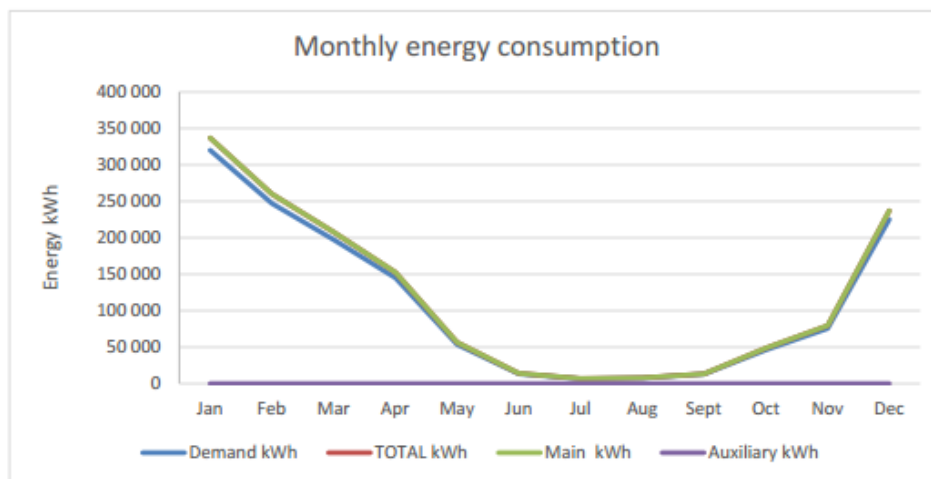
### III.3.5 Détermination de la puissance de dimensionnement

La consommation mensuelle globale de la serre agricole est représentée dans le tableau.

**Tableau III.1** : la puissance annuelle estimé pour alimenter la serre.

	Demand kWh	TOTAL kWh	Main kWh	Auxiliary kWh
Jan	320 138	336 987	336 987	0
Feb	247 084	260 089	260 089	0
Mar	197 649	208 052	208 052	0
Apr	144 846	152 470	152 470	0
May	53 565	56 385	56 385	0
Jun	13 358	14 061	14 061	0
Jul	6 519	6 862	6 862	0
Aug	7 391	7 780	7 780	0
Sept	12 801	13 475	13 475	0
Oct	46 006	48 427	48 427	0
Nov	75 622	79 602	79 602	0
Dec	225 242	237 096	237 096	0
<b>Total</b>	<b>1 350 222</b>	<b>1 421 287</b>	<b>1 421 287</b>	<b>0</b>

Tel que les normes de dimensionnement l'indiquent, nous avons choisis la puissance consommée pendant le mois de janvier comme référence parce qu'elle présente la consommation maximale.



**Figure III-5** : consommation de l'énergie en fonction du temps.

Cette figure ci-dessus représente la variation de l'énergie consommée par la serre en fonction du temps, on remarque moins de consommation en été, par contre on marque une consommation maximale en hiver.

III.4 Le Climat à l'intérieur de la serre :

III.4.1 Le Climat de la serre agricole du mois de janvier :

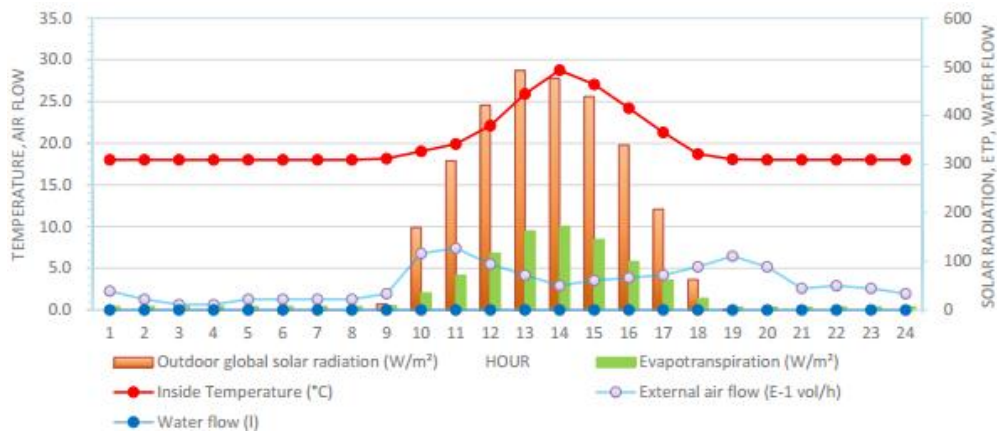


Figure III-6 : la température extérieure en fonction du temps.

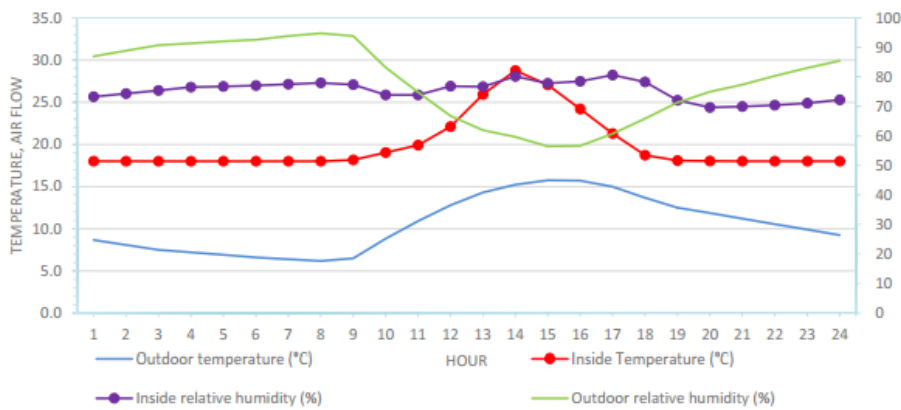


Figure III-7 : l'humidité en fonction du temps.

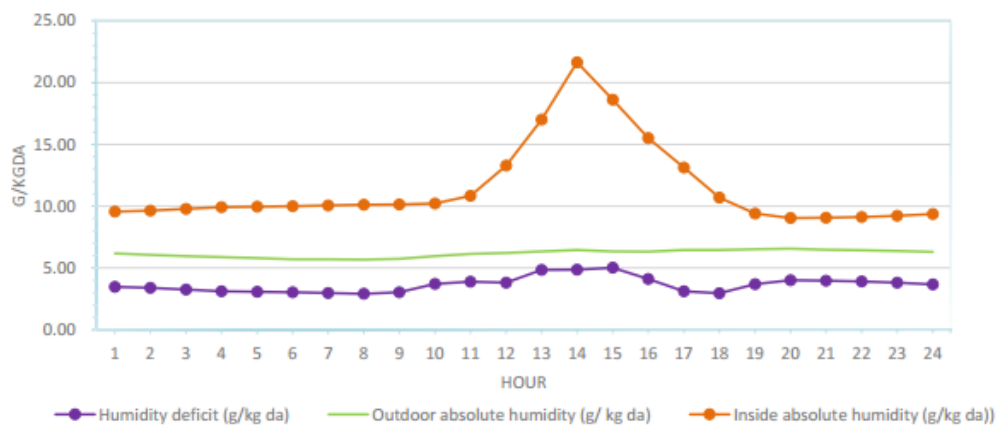


Figure III-8 : l'humidité intérieure et extérieure.

On remarque que la courbe de la température stabilise autour d'une valeur de 20°C (1h à 10h), et augment entre 11h et 15h du matin, contrairement, l'humidité a à ce temps-là, environ 60%.

III.4.2 Le Climat de la serre agricole du mois de mars :

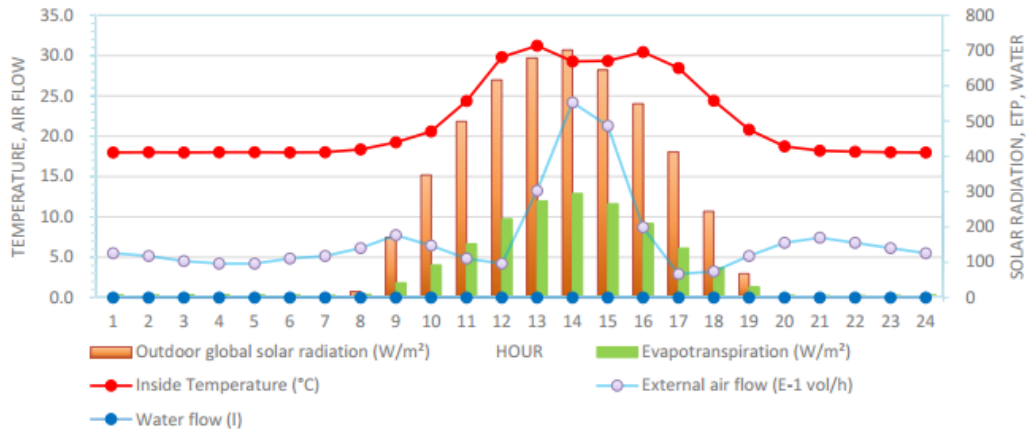


Figure III-9 : la température extérieure en fonction du temps.

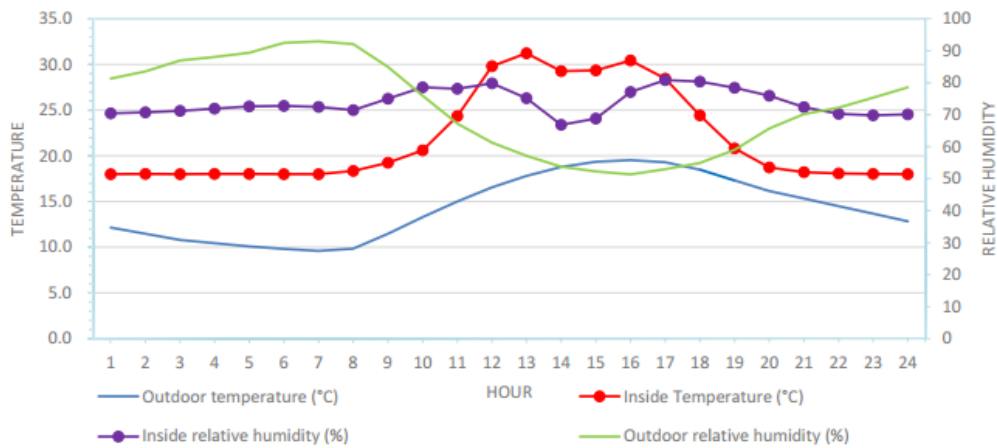


Figure III-10 : l'humidité en fonction du temps.

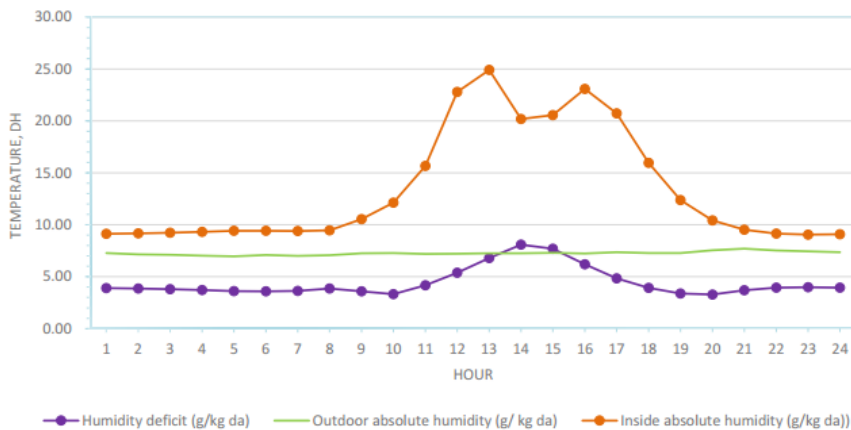
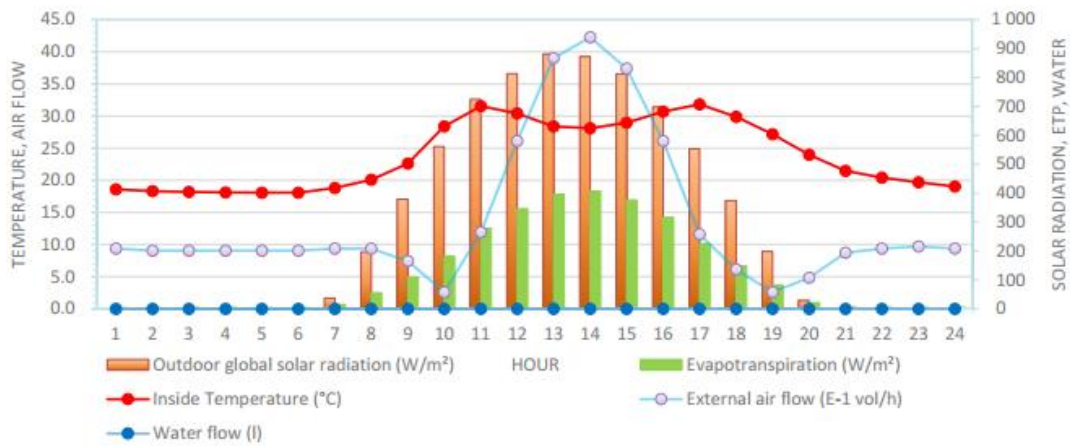


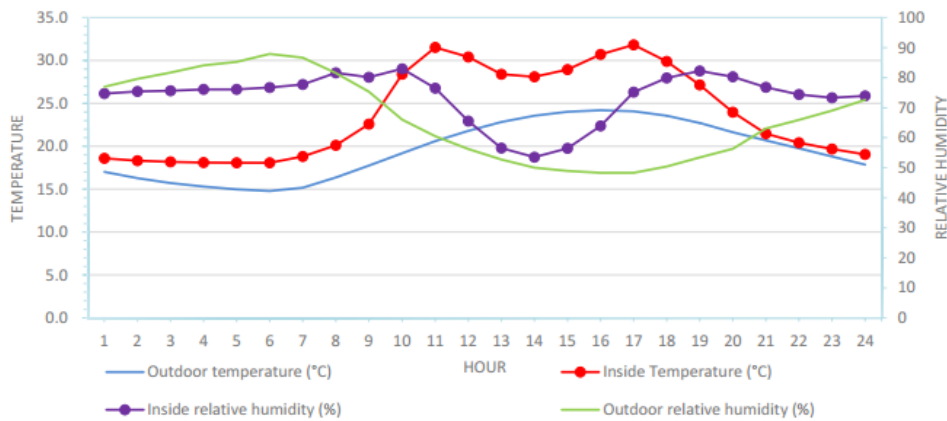
Figure III-11 : l'humidité intérieure et extérieure.

On observe qu'au mois de mars la température augmente pour atteindre une valeur maximum égale à 30°C, et l'humidité a baissé jusqu'à 50%

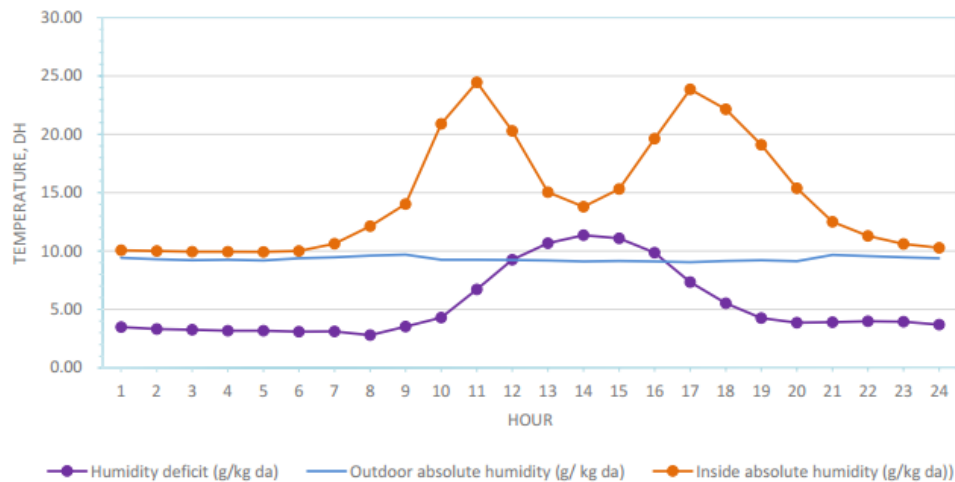
**III.4.3 Le Climat de la serre agricole du mois de mai :**



**Figure III-12 :** la température extérieure en fonction du temps.



**Figure III-13 :** l'humidité en fonction du temps.



**Figure III-14 :** l'humidité intérieure et extérieure.

En Mois de mai la température intérieur est supérieur à la température extérieur, l'humidité intérieur supérieur aussi par rapport à l'humidité extérieur

III.4.4 Le Climat de la serre agricole du mois de novembre :

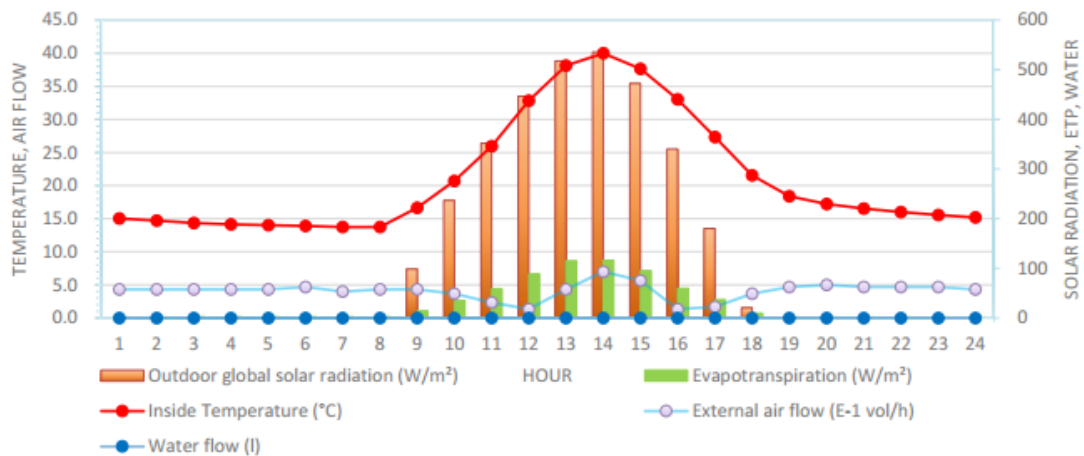


Figure III-15 : la température extérieure en fonction du temps.

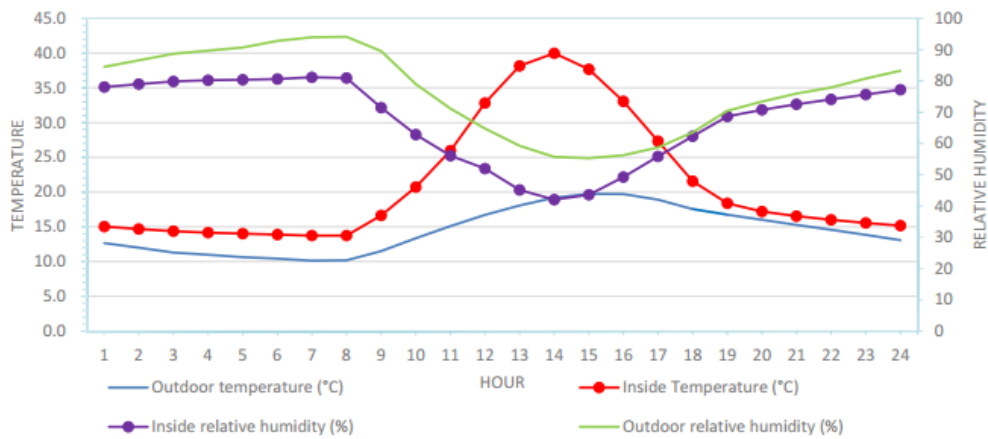


Figure III-16 : l'humidité en fonction du temps.

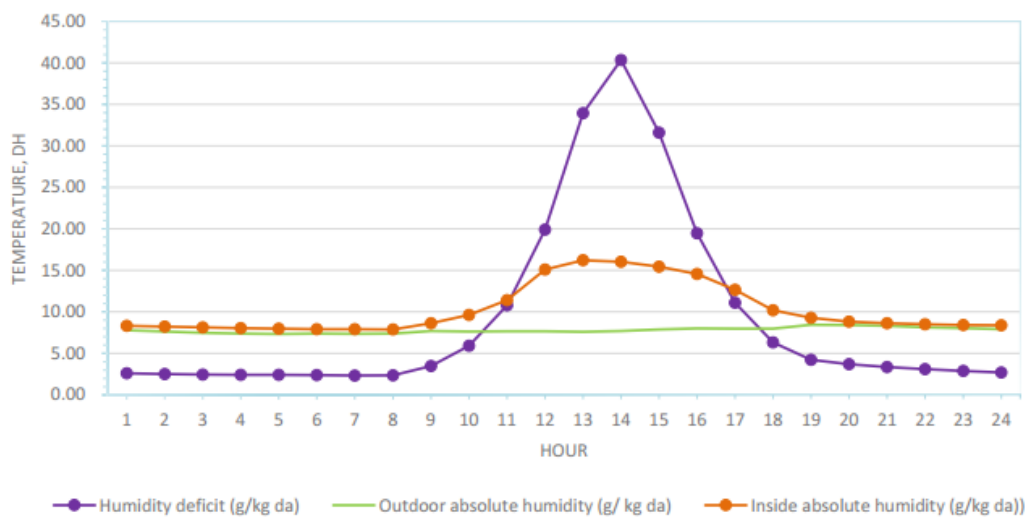


Figure III-17 : l'humidité intérieure et extérieure.

### III.5 Température en fonction de la radiation solaire :

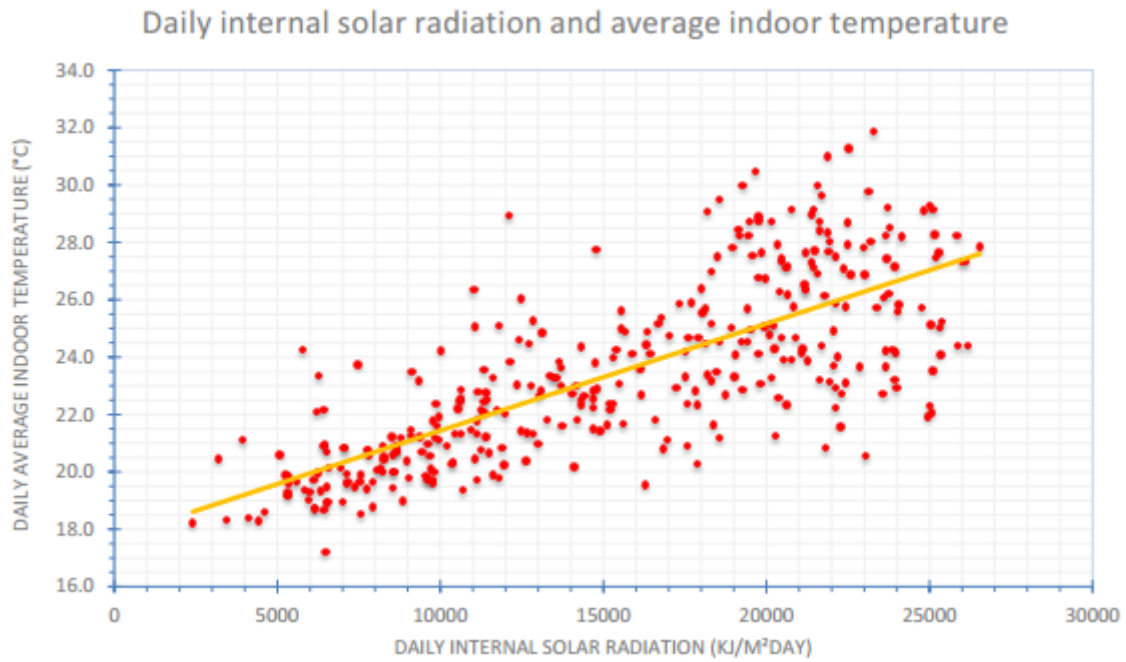


Figure III-18 : température interne en fonction de l'irradiation solaire.

### III.6 Consommation de l'énergie électrique :

#### III.6.1 Consommation de l'énergie du mois de janvier :

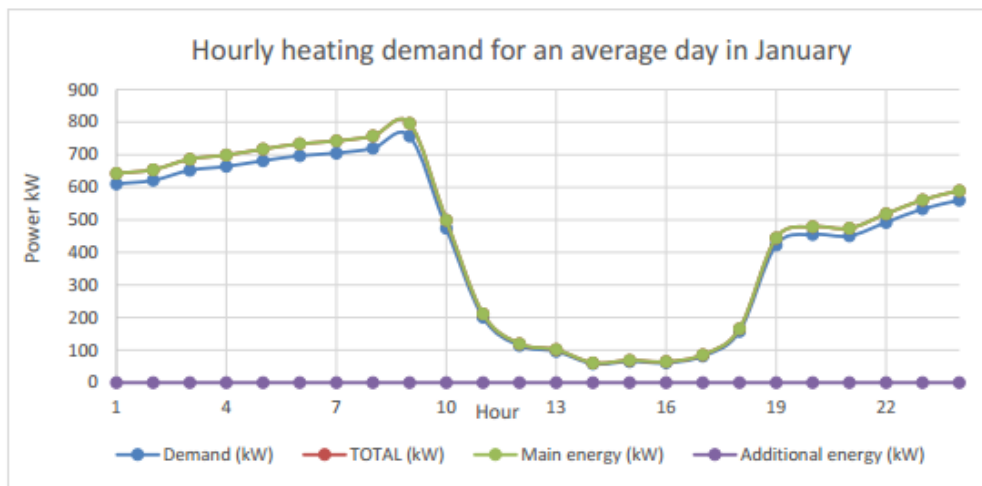
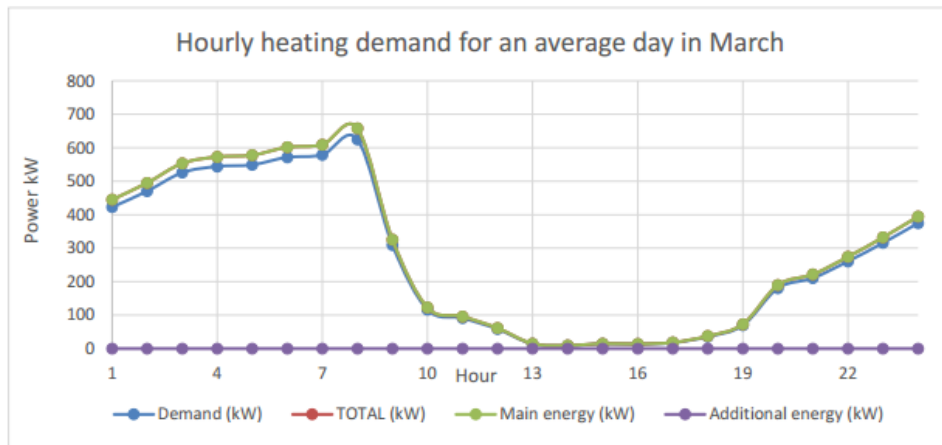


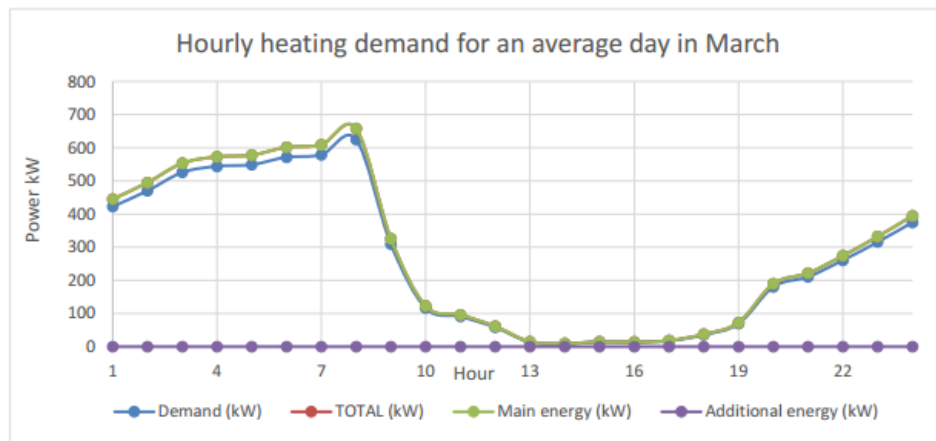
Figure III-19: la puissance en fonction du temps.

**III.6.2 : Consommation de l'énergie du mois de mars :**



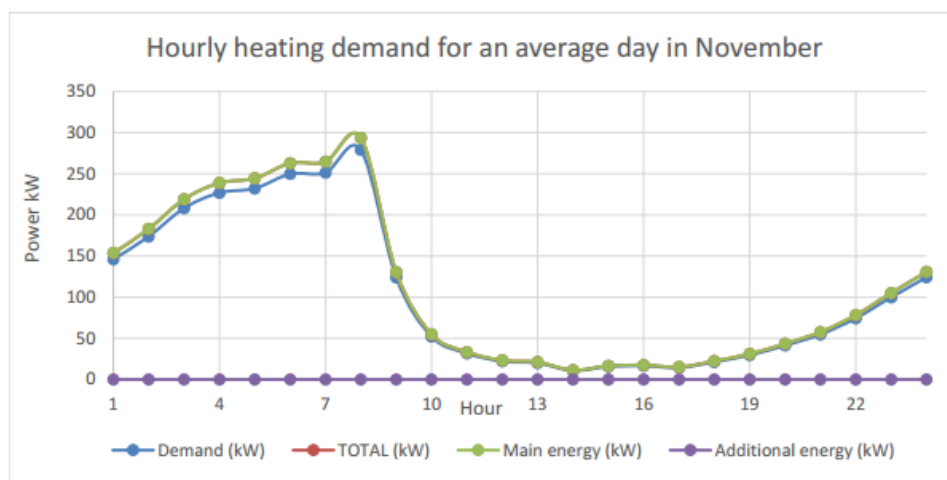
**Figure III-20:** la puissance en fonction du temps.

**III.6.3 : Consommation de l'énergie du mois de mai :**



**Figure III-21:** la puissance en fonction du temps.

**III.6.4 Consommation de l'énergie du mois de novembre :**



**Figure III-22:** la puissance en fonction du temps.

### III.7 Irradiation solaire :

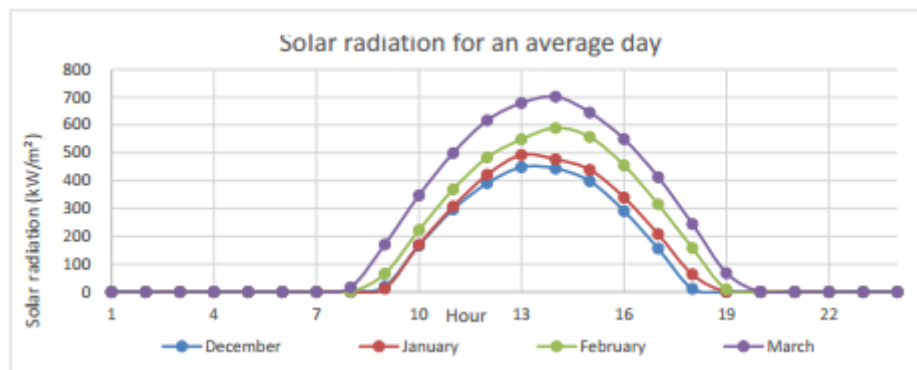
**Tableau III.2** : L'irradiation moyenne annuelle.

Month	Average outdoor temperature (°C)	Minimum outdoor temperature (°C)	Maximum outdoor temperature (°C)	External average relative humidity (%)	External average global solar radiation (kWh/ m <sup>2</sup> day)
Januray	10.5	1.5	19.7	78	2.93
February	11.9	3.7	22.1	76	3.77
March	14.3	4.6	24.8	72	4.95
April	16.0	7.1	26.5	70	6.06
May	19.5	10.3	29.6	67	7.13
June	23.2	14.2	33.5	66	7.55
July	26.3	17.8	36.8	62	7.96
August	26.4	18.3	37.0	65	6.95
September	23.2	14.7	33.3	71	5.55
October	20.3	11.3	31.7	73	4.28
November	14.5	6.5	27.0	76	3.20
December	12.1	3.3	22.3	78	2.62
Average/ Min /Max	18.2	1.5	37.0	71	5.25

On observe sur le profil annuel d'irradiation solaire pour le lieu envisagé qu'il existe une variation saisonnière marquée au niveau de l'irradiation solaire (plus importante en été).

Les figures ci-dessous illustres l'irradiation solaire pendant l'hiver et L'été.

#### III.7.1 L'irradiation solaire pendant l'hiver:



**Figure III-23:** Irradiation solaire pendant l'hiver.

### III.7.2 L'irradiation solaire pendant l'été:

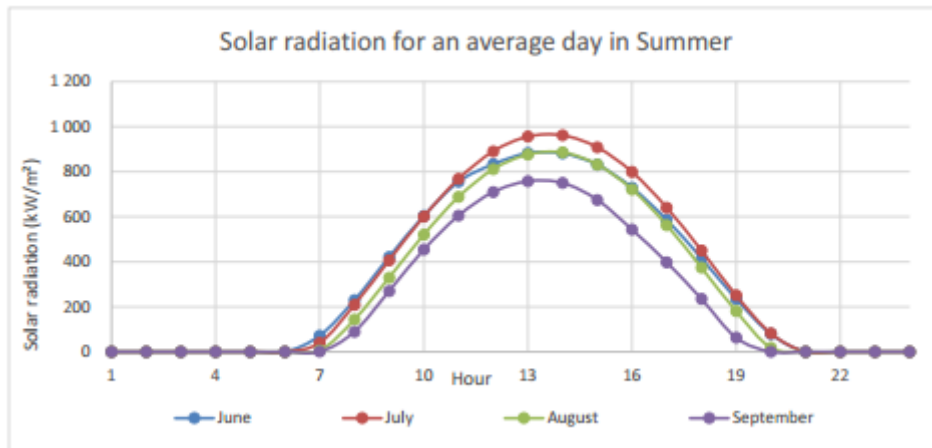


Figure III-24 : Irradiation solaire pendant l'été.

### III.8 Climat extérieur :

Les figures suivantes démontrent le climat extérieur de la serre agricole, pendant l'hiver et l'été.

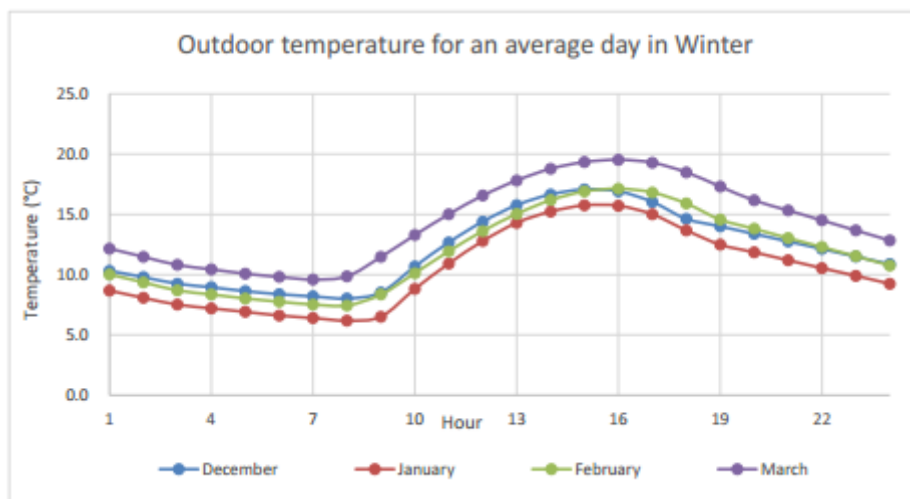


Figure III-25 : La température extérieure pendant l'hiver.

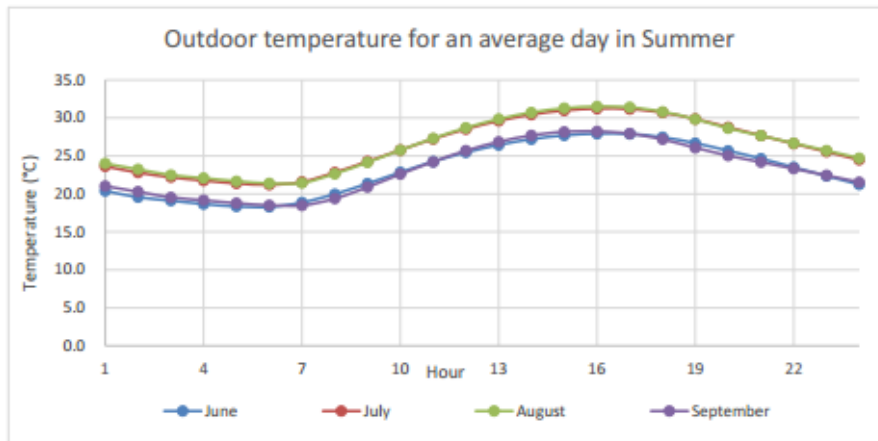


Figure III-26 : La température extérieure pendant l’été.

**III.9 Budget :**

Une simulation de budget comme nous montre dans le tableau (III.3), ou le totale du budget de consommation est égale à 4.4 €/m<sup>2</sup>.

Tableau III.3 : budget totale

	Total	Main	Auxiliary
Energy source		Gas	-
Unit price ( €/MWh)		30	0
Expenditure (€)	42 655	42 655	0
€/m <sup>2</sup>	4.4	4.4	0.0
Main vs Auxiliary (cost %)		100%	0%
Consumption MWh	1 421	1 422	0
Consumpt. / unit (kWh/m <sup>2</sup> )	148	148	0
Main vs Auxiliary (energy %)		100%	0%

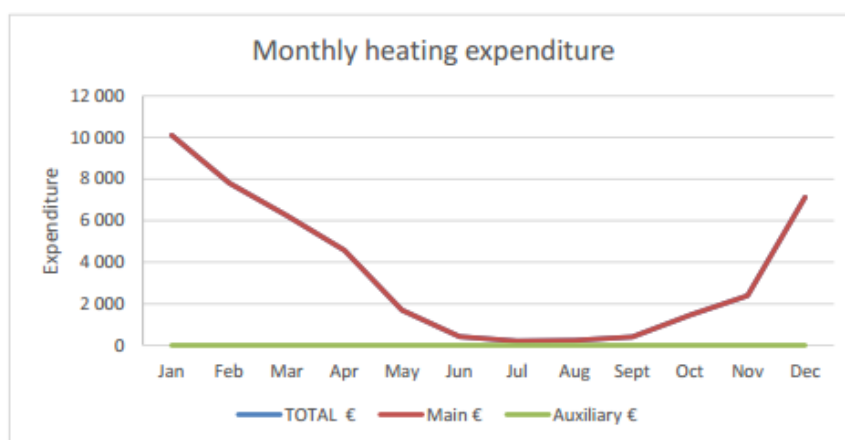


Figure III-27 : le cout totale autour de l’année.

On remarque la réduction du coût à l'été à cause de la température élevée et moins consommation de la chaudière.

### III.10.1 Déterminer la consommation électrique totale

Le coût de la production solaire est très important, il faut procéder à une économie d'énergie au niveau des récepteurs par une technologie de basse consommation ou remplacer le parc existant par un autre sous tension continue. Même s'ils sont onéreux à l'achat, le coût global sera bien moindre car il faudra minimiser le nombre des modules photovoltaïques et des batteries pour les alimenter.

$$E = P * T \quad (\text{III.1})$$

Où : E : énergie, P : puissance et t : temps d'utilisation

L'énergie E, est donc l'énergie électrique consommée en 24 h par l'application et s'exprime en Watt- heure par jour (Wh/j). Pour calculer la consommation totale d'une installation, on calcule d'abord l'énergie électrique consommée en 24h par chaque équipement ou chaque fonction électrique et ensuite on les additionne suivant l'équation (4.2).

$$\text{Ou} \quad Et = \sum_{i=1}^n P_i t_i \quad (\text{III.2})$$

Avec :  $P_i$  : puissance électrique d'un appareil exprimée en Watt (W),  $t_i$  : durée d'utilisation de cet appareil en heure par jour (h/j)

Lorsque tous les appareils fonctionnent à la même tension, la consommation journalière peut également se compter en Ampère- heure par jour (Ah/j), unité pratique pour tous les systèmes liés à une batterie.

### III.10.2 Détermination de la puissance de dimensionnement

Tel que les normes de dimensionnement l'indiquent, nous avons choisis la puissance consommée pendant le mois de janvier comme référence parce qu'elle présente la consommation maximale (2103kwh/j). Le site contient une serre agricole.

### III.10.3 Le nombre d'heures équivalent

La notion d'heures équivalentes exprime la durée où l'ensoleillement maximal se produit au cours de la journée malgré la variation du rayonnement solaire, Donc sa valeur  $N_e$  est obtenue suite à la connaissance de l'ensoleillement, on obtient la valeur moyenne  $E_{sol}$  du rayonnement solaire.

$$E_{sol} = N_e * 1000 \quad (\text{soit } N_e = \frac{N_e}{1000}) \quad (\text{III.3})$$

Avec :  $E_{sol}$  : l'ensoleillement du site (Wh/m<sup>2</sup>/jour)

$N_e$  : Nombre d'heures équivalentes (h/jour)

$$\text{Soit} \quad N_e = \frac{E_{sol}}{1000} \quad (\text{III.4})$$

### - La détermination du coefficient de perte

Les pertes inhérentes à tout processus de conversion d'énergie sont nombreuses et doivent être réduites au minimum. Les systèmes photovoltaïques doivent fournir l'énergie nécessaire et compenser les pertes prévisibles.

Finalement on prendra comme valeur de CP, la somme de toutes les pertes intervenant dans le système, donc :

$$C_p = 0,6 \quad (\text{III.5})$$

## III.11 Dimensionnement du stockage

La technologie de stockage la plus répandue actuellement dans les systèmes photovoltaïques, est la technologie électrochimique Plomb-Acide.

Son invention en 1859 par Gaston Planté, l'utilisation des accumulateurs Plomb-Acide s'est largement développée.

### III.11.1 Les principaux domaines d'application

Leurs principaux domaines d'application actuels sont les suivants :

- **Batteries de démarrage de véhicules thermiques** : Il s'agit de leur domaine d'application le plus important.

- **Ecrêtage des pointes de consommation** : Des systèmes de stockage de forte puissance (plusieurs centaines de kW) ont été installés dans plusieurs pays depuis les années 90 pour fournir au réseau une réserve de puissance nécessaire pour passer les pointes de consommation.

- **Alimentation de secours** : Les alimentations sans interruption (ASI) permettent d'assurer la fourniture des charges électriques sensibles lors des défaillances du réseau principal. Les batteries Plomb\_Acide font partie des technologies employées dans ces systèmes.

- **Traction électrique** : Dans ce type d'application, les batteries Plomb-Acide stockent la réserve d'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule électrique (ou hybride).

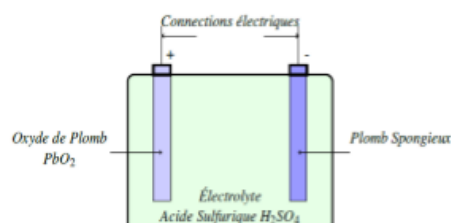
– **Systèmes photovoltaïques** : Les batteries Plomb-Acide sont étaiées utilisées en stockage tampon dans les systèmes stationnaires autonomes.

Cependant, les technologies employées diffèrent en fonction de l'application visée. En ce qui concerne les électrodes de la batterie, il est possible de distinguer les plaques planes des plaques tubulaires. Dans le cas des plaques planes, les électrodes positives et négatives sont constituées par un ensemble de plaques parallèles reliées entre elles par une barrette (**Figure III-28**) Les plaques tubulaires sont utilisées uniquement pour l'électrode positive. Dans ce cas, l'électrode est constituée par un ensemble de tubes remplis de matière active



**Figure III-28** : Technologies principales d'électrodes.

Il est possible de distinguer les accumulateurs en fonction de la nature de leur électrolyte électrolytes liquides où électrolytes gélifiés (technologie GEL). On désigne par batterie sans entretien les technologies à électrolyte gélifié, la plus connue étant la technologie VRLA. Bien que le choix entre ces différentes technologies se fera en fonction de l'application visée. On s'orientera vers des technologies à longue durée de vie et avec le moins de maintenance possible. La Figure III.29 représente le schéma théorique d'un accumulateur Plomb acide. L'électrode positive en dioxyde de plomb et l'électrode négative en plomb spongieux sont plongées dans une solution aqueuse d'acide sulfurique composant l'électrolyte. La f.e.m standard d'un élément Plomb-Acide est égale à 2,042 V. Des éléments sont reliés en série de façon à obtenir la tension continue souhaitée.



**Figure III-29** Vue schématique d'un accumulateur Plomb-Acide

Dimensionner une batterie, c'est choisir un stockage tampon permettant de s'affranchir des variations climatiques temporaires de la journée et des quelques jours de mauvais temps. Il assure aussi le fonctionnement nocturne. La capacité de stockage peut se diviser en deux termes, un stockage à court terme et un stockage à long terme. Le premier, appelé « effet tampon » de la batterie, représente l'énergie à satisfaire lors de passage nuageux. Le second, quant à lui, représente l'énergie à stocker pour assurer la charge durant les périodes sans ou à faible ensoleillement et vendre le surplus au réseau. Les accumulateurs électrochimiques requis pour niveler la charge doivent avoir les caractéristiques suivantes, hauts rendements (70 – 85 %), durée de vie élevée (3000 – 4000 cycles), et faible coût. Comme on la mentionne au chapitre 1 le stockage électrochimique par l'intermédiaire de batteries au plomb remplit d'une manière satisfaisante ces critères.

### III.11.2 Caractéristiques des accumulateurs

Les caractéristiques principales d'un accumulateur sont la tension et la capacité : - La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2 V. Sa valeur varie entre 1,7 V et 2,4 V suivant l'état de charge dans les conditions normales de fonctionnement.

- Capacité est fournie par les constructeurs pour un régime de décharge de 10 heures (C10). Cependant, dans le cas d'applications photovoltaïques pour lesquelles les durées de charge et de décharge sont plus longues, les capacités sont exprimées en C20 ou C100.

#### - La capacité utile

La capacité utile pour un fonctionnement de  $N_{ja}$  jours et un besoin électrique journalier  $E_{cons}$  est de

$$C_U = N_{ja} \times E_{cons} \quad (III.6)$$

Avec :  $C_U$  : capacité utile de la batterie en Wh.

$N_{ja}$  : nombre des jours d'autonomie sans apport solaire.

$E_{cons}$  : consommation journalière du site en Wh/j.

Cette capacité utile  $C_U$  est la capacité réellement disponible sur le terrain à tout moment, mais est différente de la capacité nominale  $C_{nom}$ .

### III.12 Dimensionnement du régulateur

Les batteries doivent être impérativement protégées contre les surcharges et les décharges profondes, aussi il est nécessaire d'y adjoindre un régulateur. Le régulateur est un élément central d'un système photovoltaïque. Car il contrôle les flux d'énergie et protège la batterie

contre les surcharges et décharges profondes dues à l'utilisation. Le régulateur sera dimensionné en fonction de la tension du champ photovoltaïque et le courant de charge maximale. Pour estimer le courant, on prendra 1,5 fois le courant total maximal ( $I_m$ ) au point de puissance maximale. Quoique le développement de la technologie de régulation a connu dans ces derniers temps un grand essor, la régulation intelligente reste la plus efficace aujourd'hui.

### III.13 Dimensionnement des convertisseurs

#### . Dimensionnement du Convertisseur Continu- Continu (Les Hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continus-continus permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle, dont le rôle est la liaison entre deux parties d'un réseau. Les convertisseurs jouent un rôle clé pour l'efficacité énergétique et la fiabilité de l'installation. Dans le cas d'un générateur photovoltaïque leur rôle ne se limite pas à adapter le courant continu généré par le panneau PV, mais consiste également à exploiter le champ PV à son point de puissance maximal.

#### III.14 Convertisseur Boost (survolteur)

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

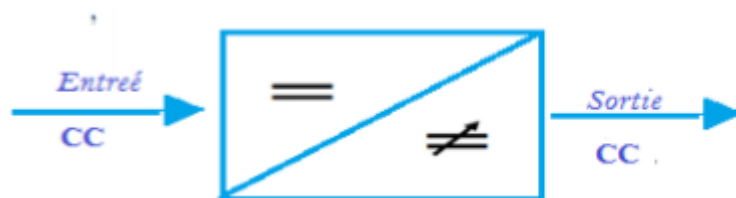
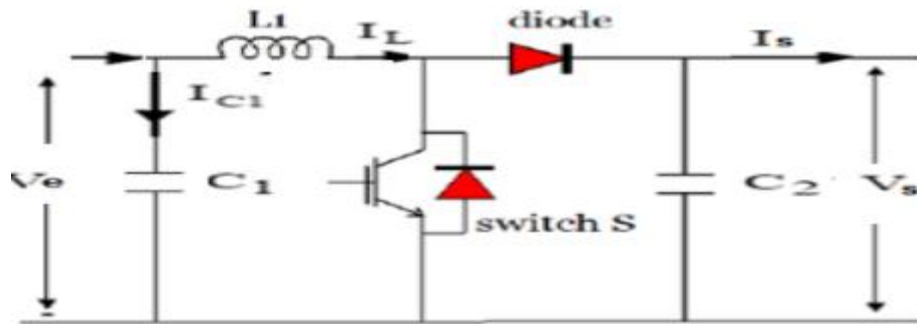


Figure III-30: Convertisseur DC/DC



**Figure III-31** : Circuit électrique équivalent du convertisseur Boost

En effet, sous les conditions changeantes, la puissance extractible est variable en fonction de la tension (ou du courant) imposée aux bornes du panneau photovoltaïque. Il est donc nécessaire que le système d'exploitation s'adapte pour extraire le plus de puissance possible d'où la création du principe de MPPT.

Dans laquelle, un convertisseur est utilisé, permettent ainsi de construire une valeur  $d$  qui est le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. Cette valeur  $d$  aboutit à la détermination de la valeur MPPT à chaque instant.

Il est possible de connaître la quantité de modules photovoltaïques nécessaires pour la fourniture de l'énergie électrique dans l'installation considérée. Dans ce chapitre, consacré à la méthode de dimensionnement des installations autonomes, nous avons intégré les données indispensables concernant les caractéristiques du site d'installation et de l'énergie solaire reçu sur le site lui-même. La première étape permet, également, de calculer la quantité de batteries. L'énergie qu'il faut stocker dépend directement de la périodicité de la consommation. Autrement dit, il vous faudra beaucoup moins de batteries si vous consommez un peu d'électricité tous les jours (consommation régulière) que si vous consommez tout en quelques jours (par exemple pendant les vacances), et cela même si dans les deux cas vous avez consommé la même quantité. Enfin, le dimensionnement de l'installation photovoltaïque autonome est terminé lorsque le calcul de la section des câbles électriques transportant l'énergie est effectué. Une section trop petite augmente la résistance et la température du câble, ce qui réduit la puissance de l'installation.

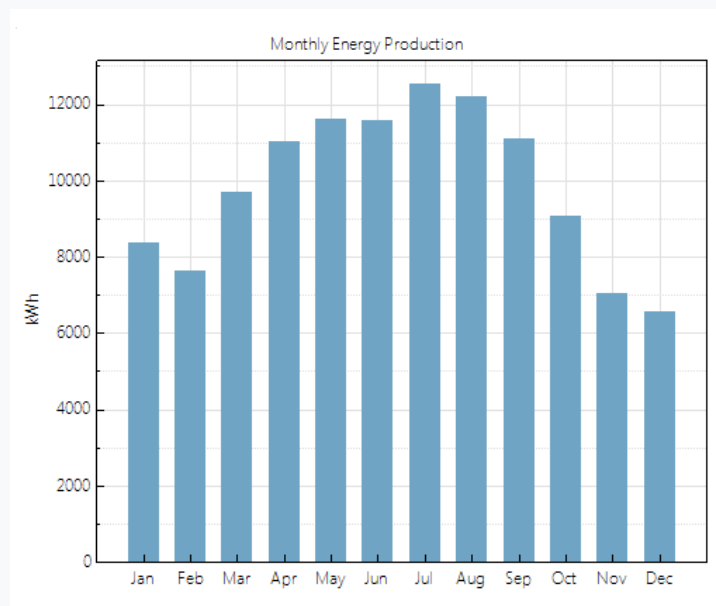
### III.15 Exploitation du Logiciel SAM

Le System Advisor Model (SAM) est un modèle de performance et financier conçu pour faciliter la prise de décision des personnes impliquées dans l'industrie des énergies renouvelables:

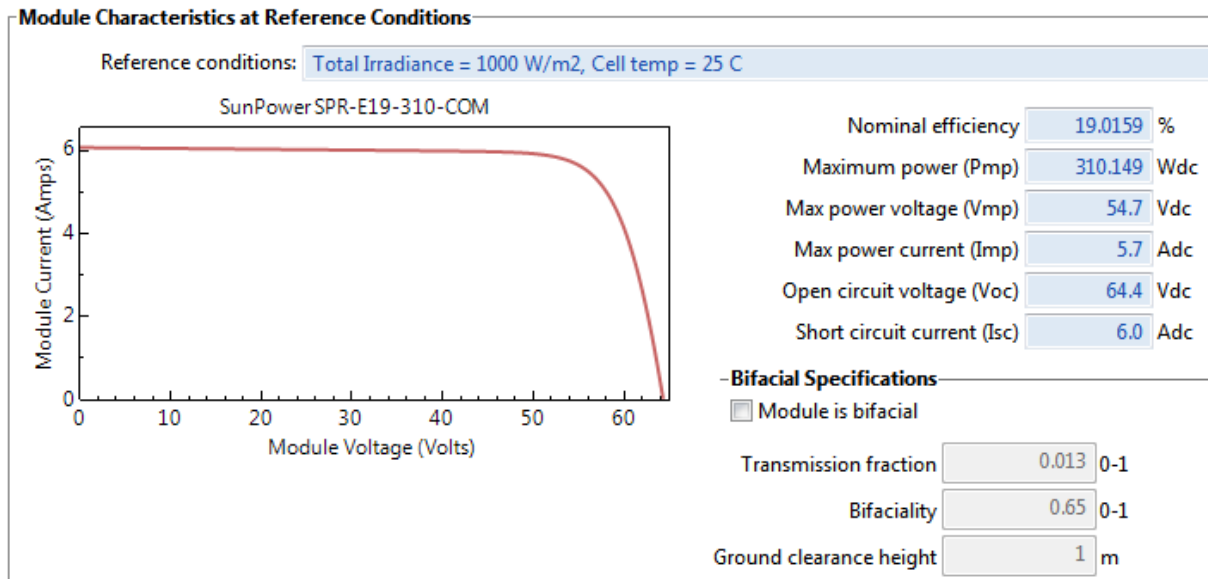
- Chefs de projet et ingénieurs.
- Analystes politiques.
- Développeurs de technologies.
- Des chercheurs.

SAM effectue des prévisions de performances et des estimations du coût de l'énergie pour les projets électriques connectés au réseau en fonction des coûts d'installation et d'exploitation et des paramètres de conception du système que vous spécifiez en tant qu'entrées du modèle.

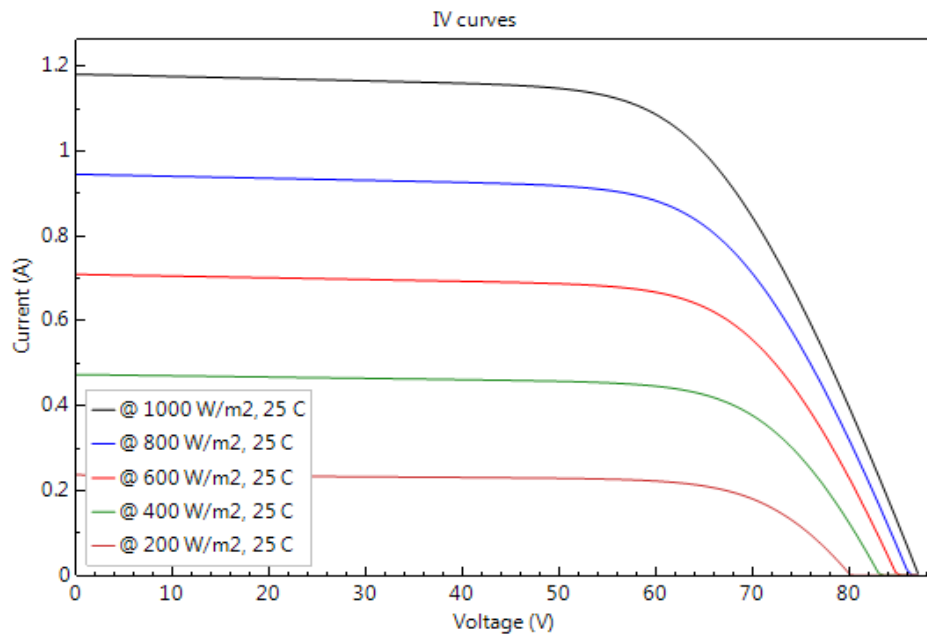
Les projets peuvent être soit du côté client du compteur électrique, achetant et vendant de l'électricité au prix de détail, soit du côté service public du compteur, vendant de l'électricité à un prix négocié dans le cadre d'un contrat d'achat d'électricité (CAE).



**Figure III-32 :** interface graphique du logiciel SAM.



**Figure III-33:** caractéristiques des modules photovoltaïques.



**Figure III-34:** courbe caractéristique du photocellule.

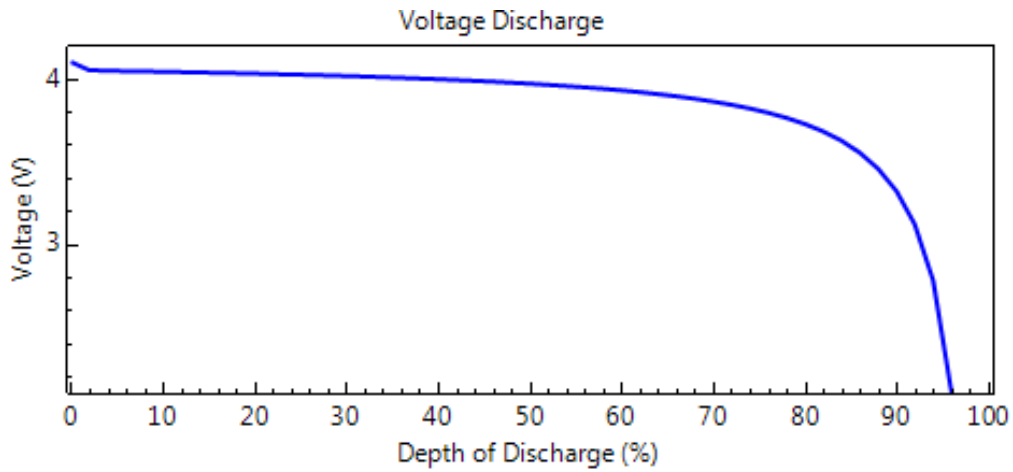


Figure 4.35 : courbe du décharge de la batterie.

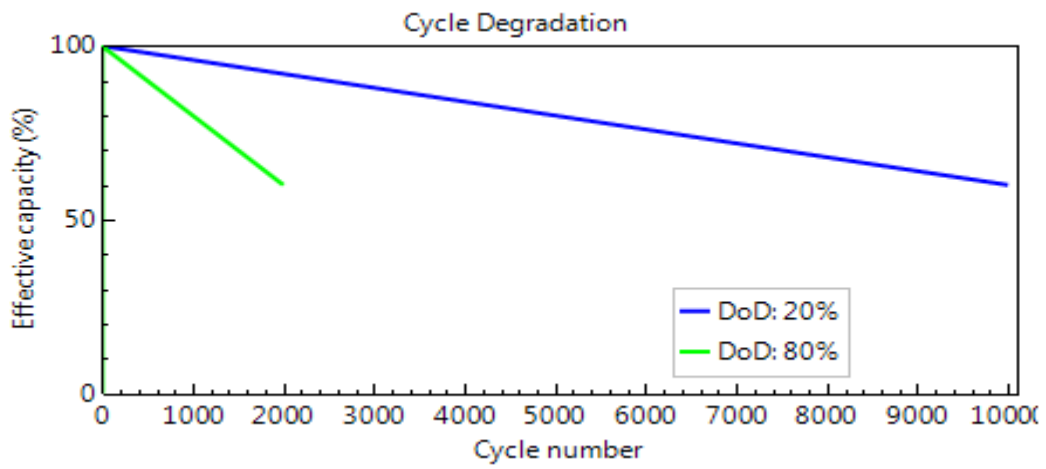


Figure III-36: cycle de dégradation de la batterie.

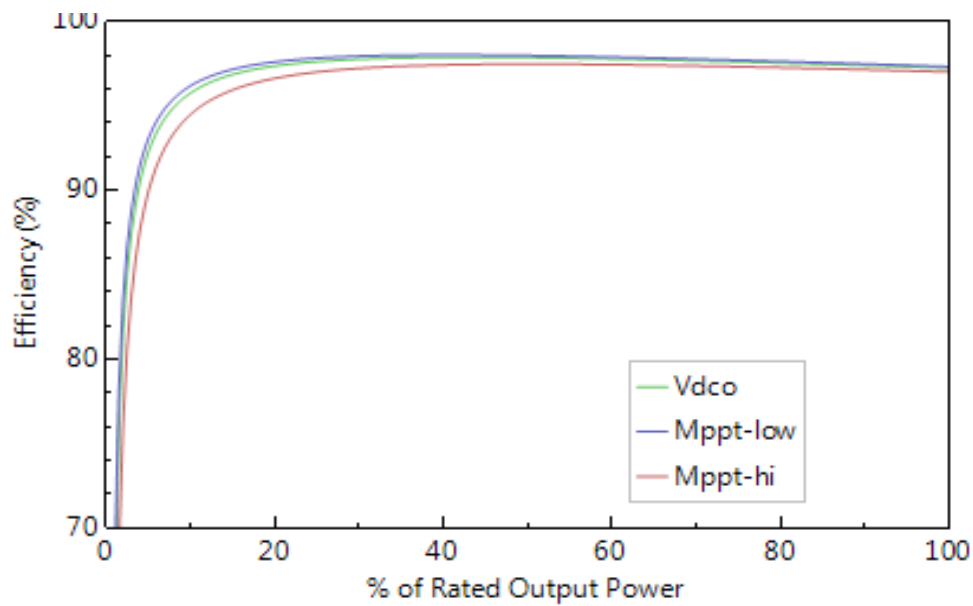


Figure III-37 : puissance de la sortie.

### III.16 CONCLUSION

Avec les données de la première étape, il est possible de connaître la quantité de modules photovoltaïques nécessaires pour la fourniture de l'énergie électrique dans l'installation considérée. Dans ce chapitre, consacré à la méthode de dimensionnement des installations autonomes, nous avons intégré les données indispensables concernant les caractéristiques du site d'installation et de l'énergie solaire reçu sur le site lui-même. La première étape permet, également, de calculer la quantité de batteries. L'énergie qu'il faut stocker dépend directement de la périodicité de la consommation. Autrement dit, il vous faudra beaucoup moins de batteries si vous consommez un peu d'électricité tous les jours (consommation régulière) que si vous consommez tout en quelques jours (par exemple pendant les vacances), et cela même si dans les deux cas vous avez consommé la même quantité. Enfin, le dimensionnement de l'installation photovoltaïque autonome est terminé lorsque le calcul de la section des câbles électriques transportant l'énergie est effectué. Une section trop petite augmente la résistance et la température du câble, ce qui réduit la puissance de l'installation.

# Chapitre IV

---

MODELISATION

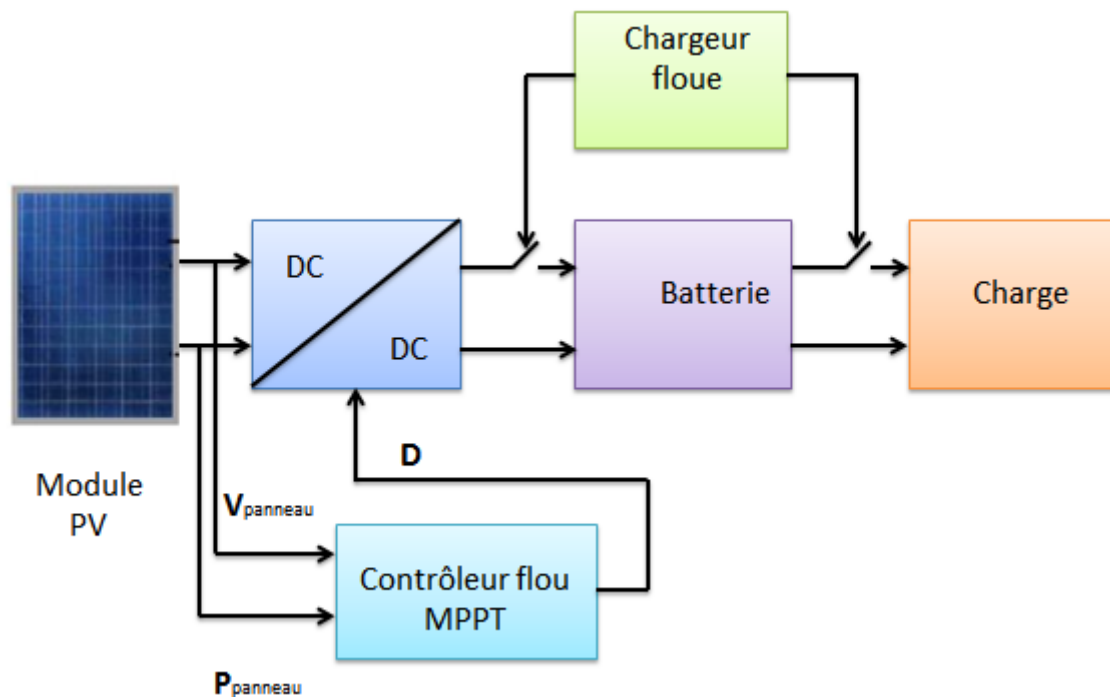
Et SIMULATION

## IV. Simulation et résultats

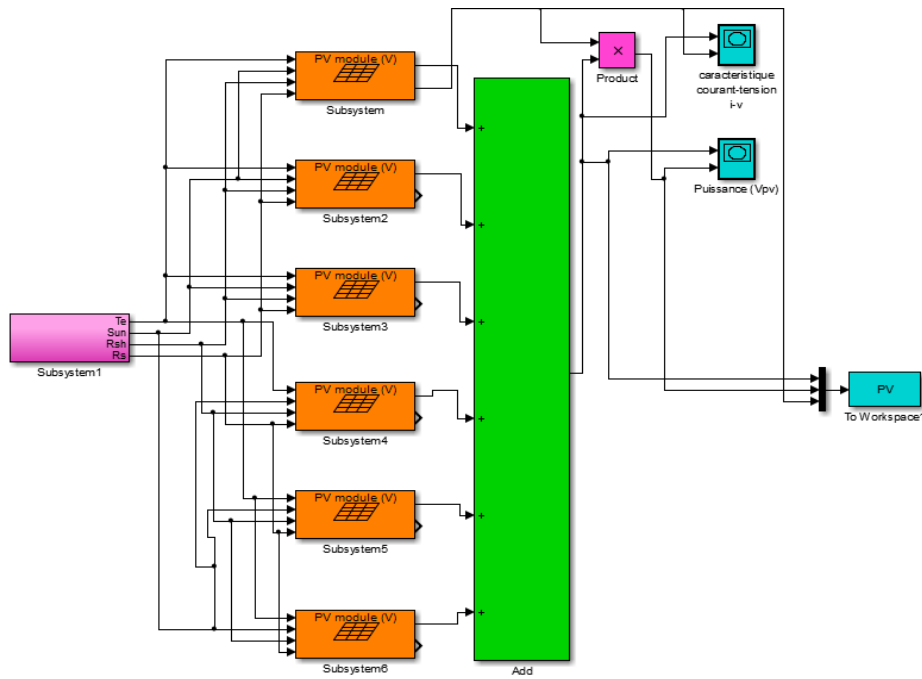
Comme notre système est composé de deux systèmes distincts. Nous l'avons alors décrit par deux sous-systèmes, à savoir: le premier qui prend en charge l'alimentation, le générateur photovoltaïque, plus le système de stockage, le second prend en charge la commande de la serre.

La figure IV.1 montre le diagramme fonctionnel du système photovoltaïque autonome. Avec:

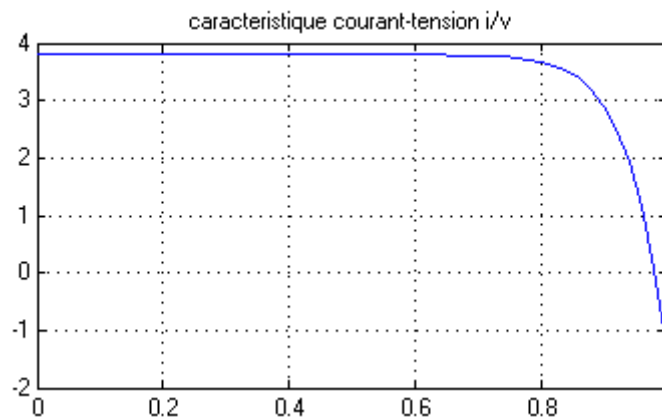
- Un panneau photovoltaïque.
- Un convertisseur DC-DC de type Boost.
- Une batterie comme charge.
- Un algorithme flou. Les graphes ci-dessous présentent les signaux d'entrées et de sorties du régulateur flou, obtenus à partir d'une simulation sous environnement Matlab/Simulink. Nous présenterons également les sorties du générateur photovoltaïque et les tensions délivrées à la charge.



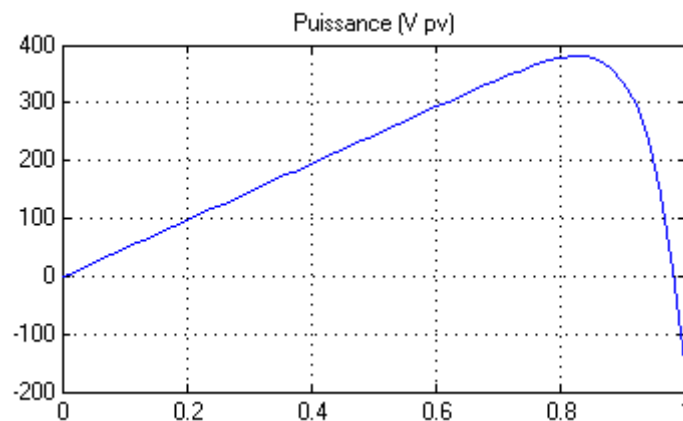
**Figure IV-1:** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome



**Figure IV-2:** schéma simulink des cellules photovoltaïque.



**Figure IV-3:** caractéristique courant-tension



**Figure IV-4 :** représentation de la puissance.

### IV.2 Régulation par contrôleur Mppt :

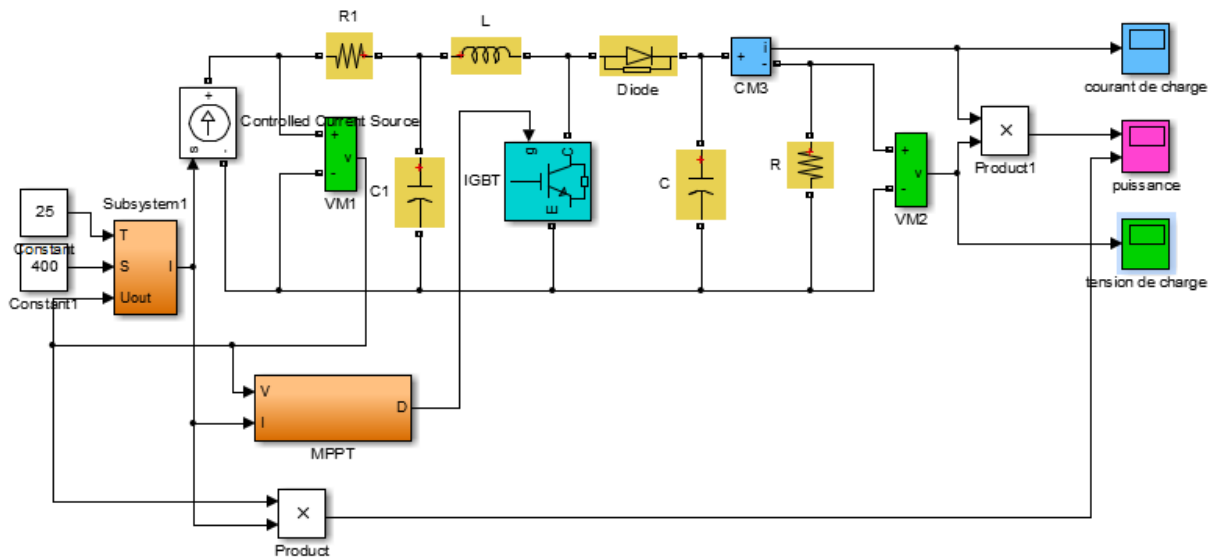
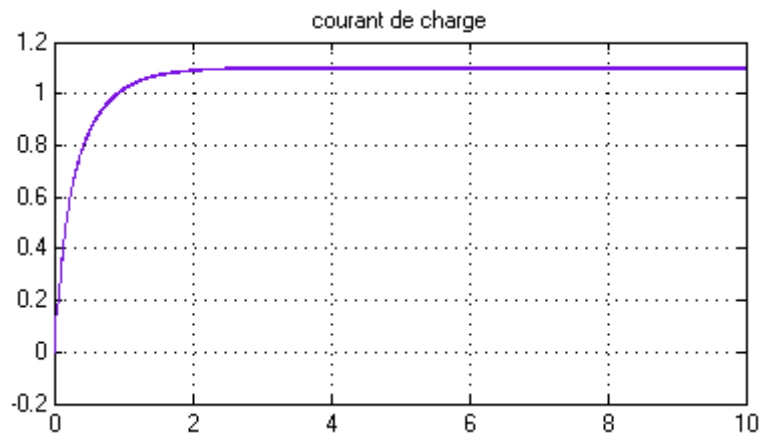


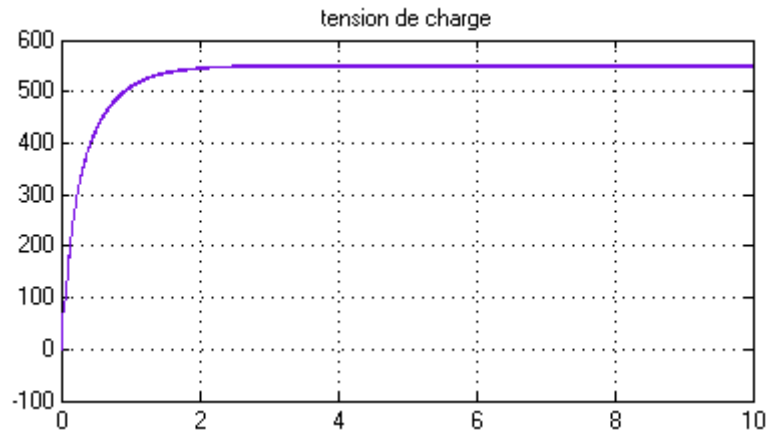
Figure IV-5 : schéma simulink MPPT.

### IV.3 Chargeur de batterie

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



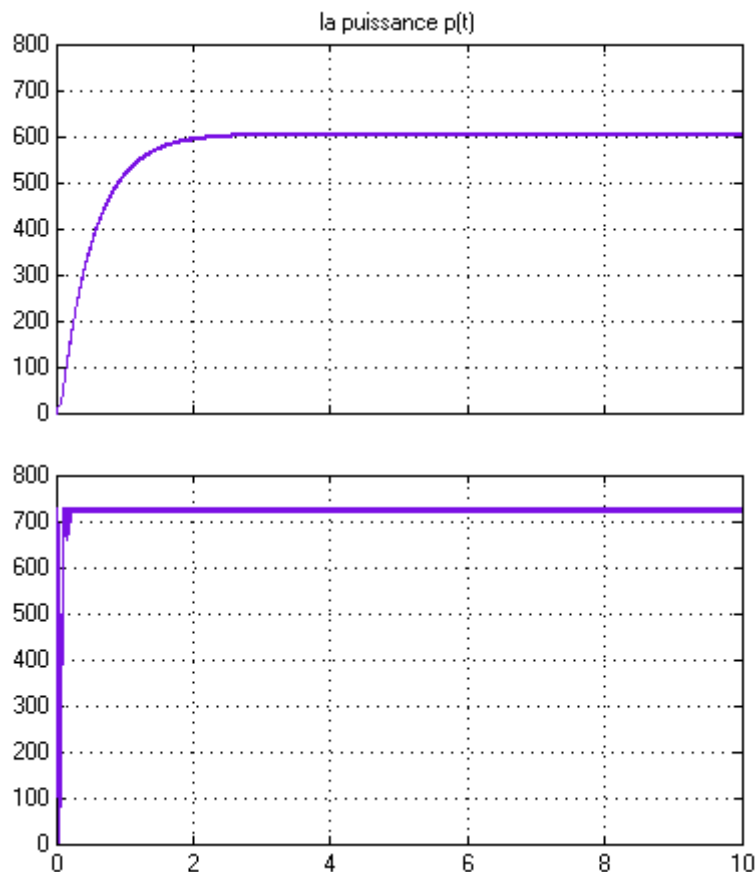
FigureIV-6 : courant de charge.



**Figure IV-7 :** tension de charge.

D'après les résultats, nous observons que le régulateur est robuste et qu'il suit la consigne quel que soit les variations. 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.

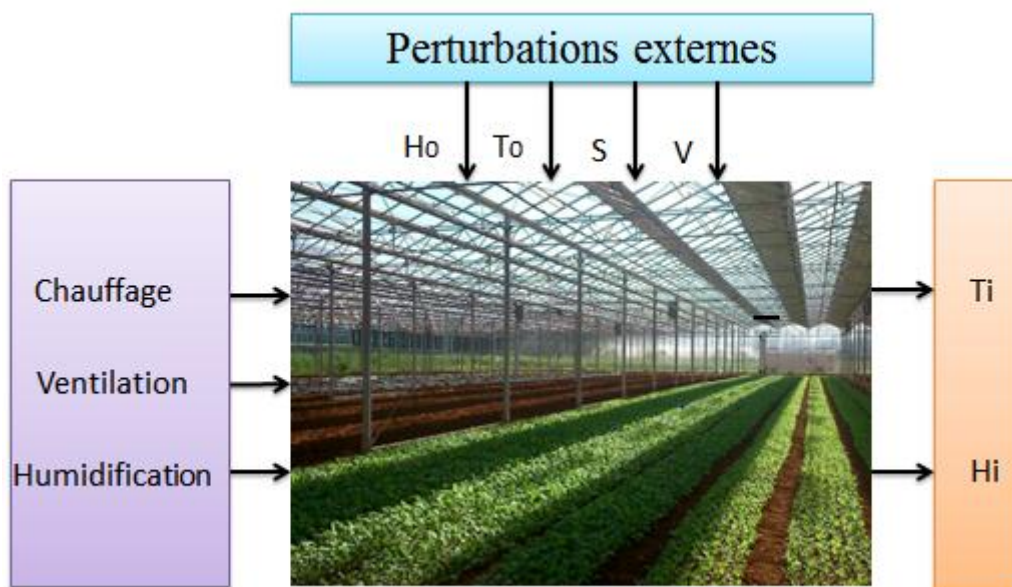
**La puissance :**



**Figure IV-8 :** la puissance en fonction du temps.

D'après les résultats, 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. 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.

#### IV.4 Définition du système

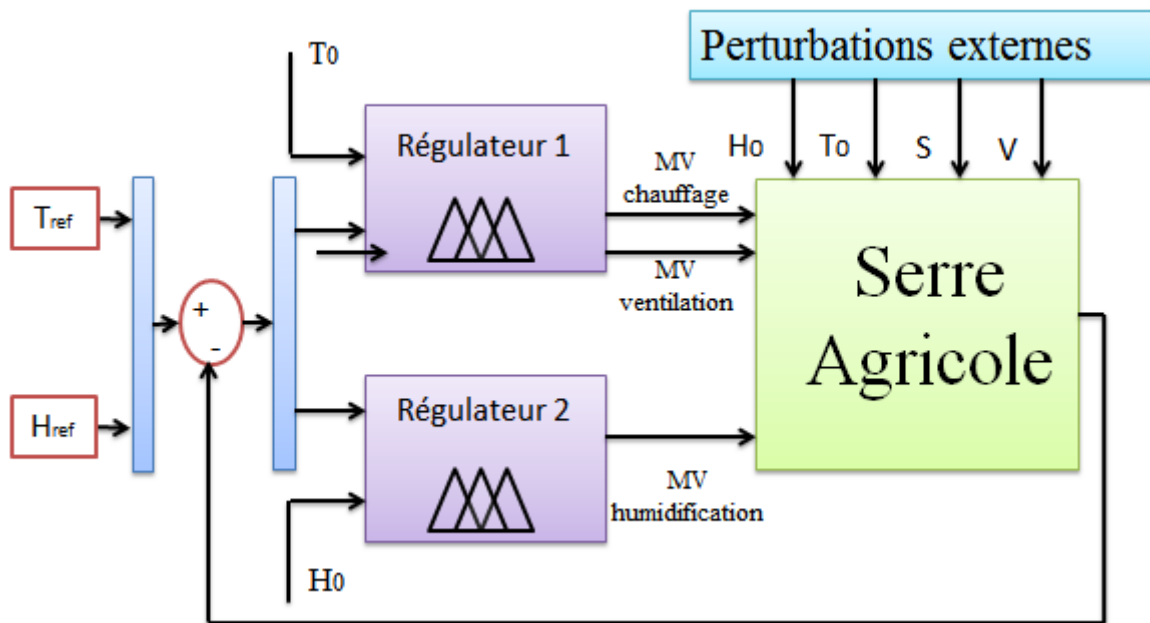


**Figure IV.9:** système serre agricole

La serre agricole est équipée de plusieurs capteurs permettant de mesurer la température externe  $T_e$  et interne  $T_i$ , en ( $^{\circ}\text{C}$ ), l'hygrométrie en (%), la vitesse du vent  $V$  en ( $\text{ms}^{-1}$ ) et le rayonnement solaire  $R$ , en ( $\text{wm}^{-2}$ ). D'autre part, plusieurs actionneurs permettent d'agir sur le chauffage, la ventilation, et l'humidification.

La détection et la localisation de défauts capteurs sur tel système sont des problèmes difficiles. La première difficulté est relative au dimensionnement du système puisque le nombre de variables (actionneurs, perturbations + climat interne) est important. Le deuxième problème est lié à la complexité des phénomènes mis en jeu (biologiques, météo logiques, évolution des plantes, vieillissement de la structure).

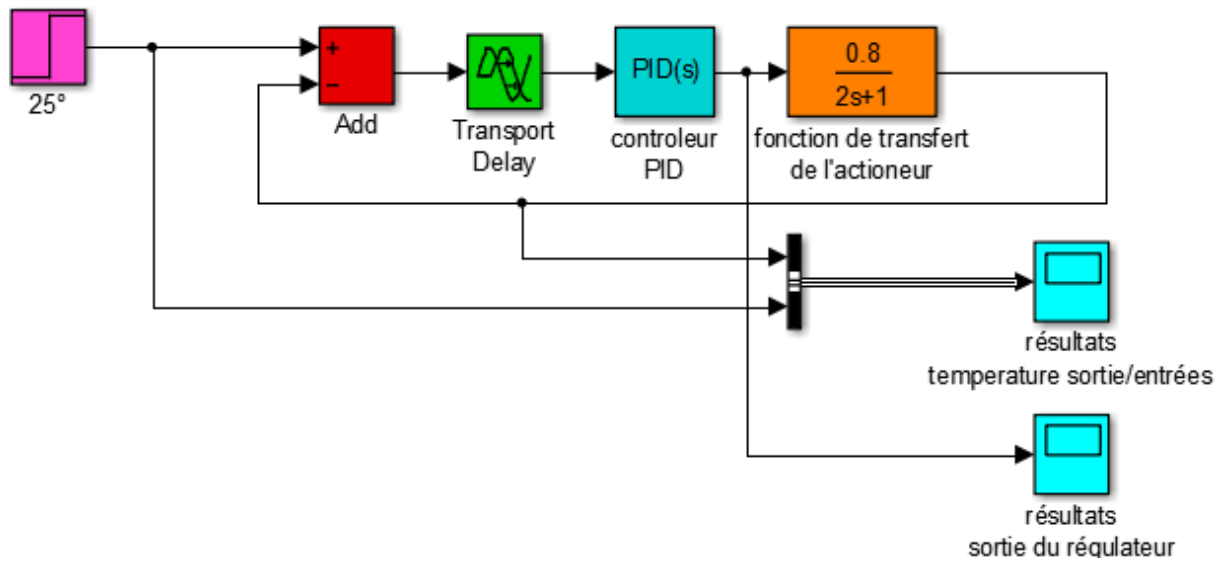
### IV.5 Contrôle du climat d'une serre agricole



**Figure IV.10:** Régulation de climat par logique floue

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, est commandé par deux régulateurs flous, le premier pour la température, le second pour l'humidité.

### IV.6 Régulation de la température de la serre en utilisant un régulateur PID :

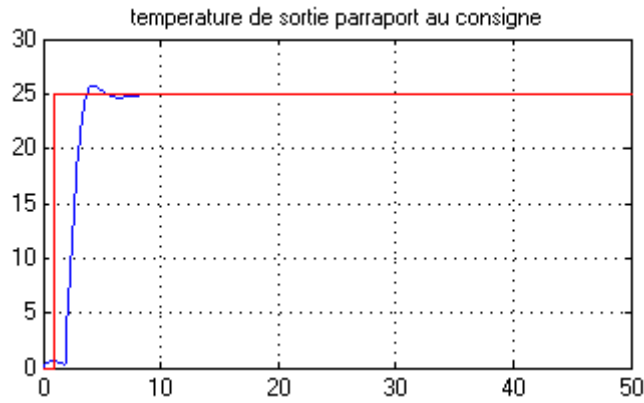


**Figure IV-11** : Contrôle de la température de la serre en utilisant un contrôleur pid.

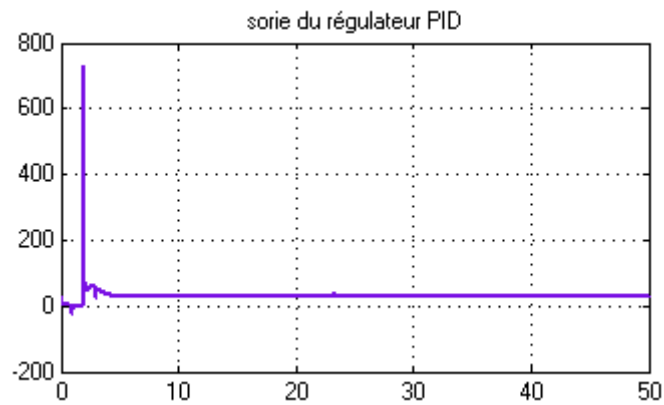
Pour le régulateur de température on a choisis un régulateur PID, les résultats sont satisfaites la réponse du régulateur est rapide pour rattraper le retard et rejoindre la consigne.

#### IV.6.1 Simulations et résultats :

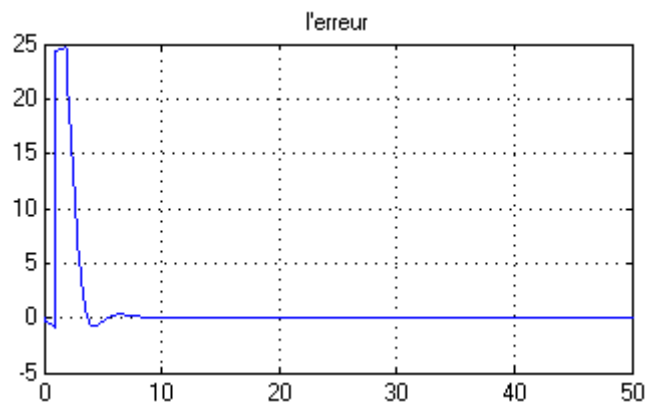
La figure ci-dessus représente les signaux consigne et mesure, couple du régulateur PID et l'erreur (écart entre consigne et mesure). Ceux du bas l'erreur entre la référence et la valeur à commander de la température ( $T_{ref} - T_i$ ). Dans notre simulation, nous avons choisi un pas de  $500\text{ s}$  ( $\approx 9$  minutes), parce que les variations de la température et de l'humidité  $T_i$  et  $H_i$  sont assez lentes en réalité.



**Figure IV-12 :** Régulation de la température en fonction du temps.

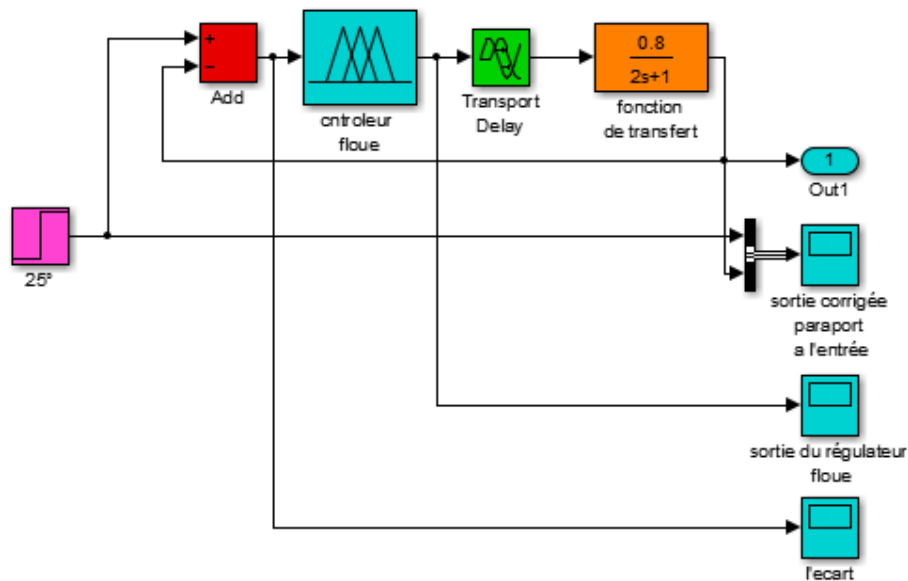


**Figure IV-13 :** Sortie du régulateur PID.



**Figure IV-14 :** L'écart entre la consigne et la mesure

### IV.6.2 Contrôle de la température par un contrôleur floue :



**Figure IV-15** : schéma simulink du régulateur de température flou.

Pour le réglage de la température, on a choisi la consigne de 25°C.

Les variables linguistiques Pour le contrôle de la température

on a considéré les grandeurs suivantes pour les variables de commande :

L'erreur  $\varepsilon$  représente la différence entre la consigne et la sortie réelle.

La sortie commande qui représente la température de l'eau chaude circulant dans le serpentin.

La fuzzification des variables de commande pour le réglage de la température donne les variables linguistiques suivantes :

- $T(\varepsilon)$  = (chaud, tiède (ok), froid)
- $T(\text{commande})$  = (refroidir, rien, réchauffer)

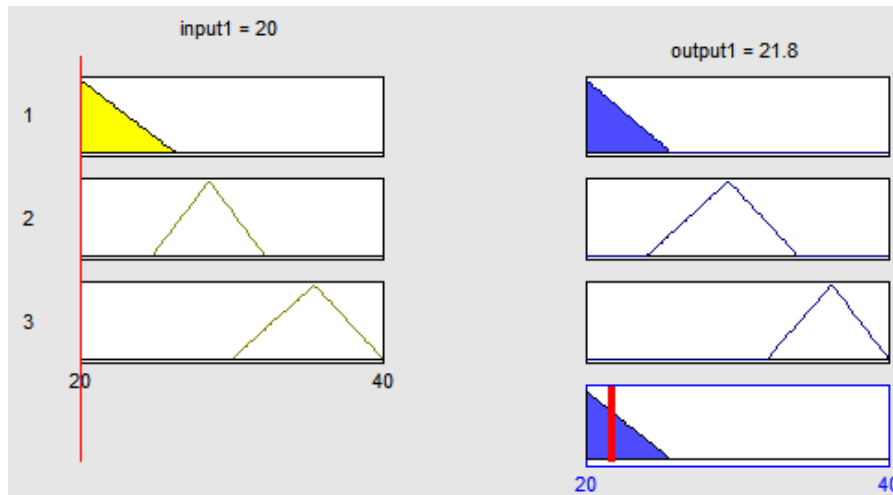


Figure IV-16 : représentation des entrées et sorties floues du régulateur.

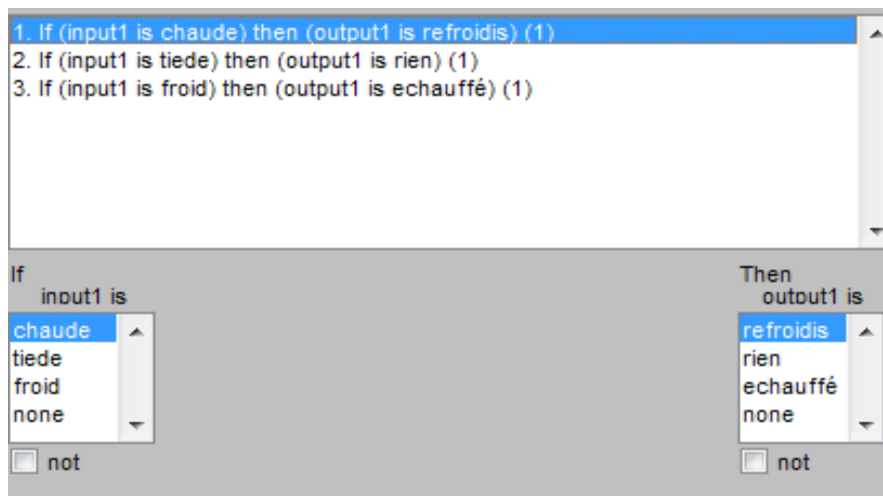


Figure IV-17 : les règles d'inférence.

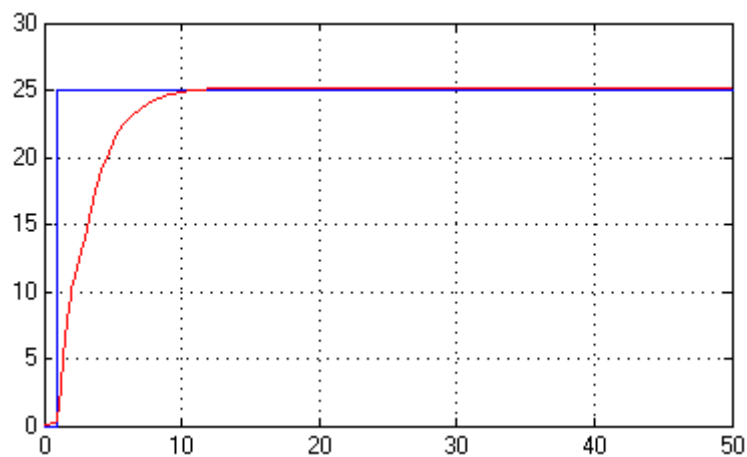
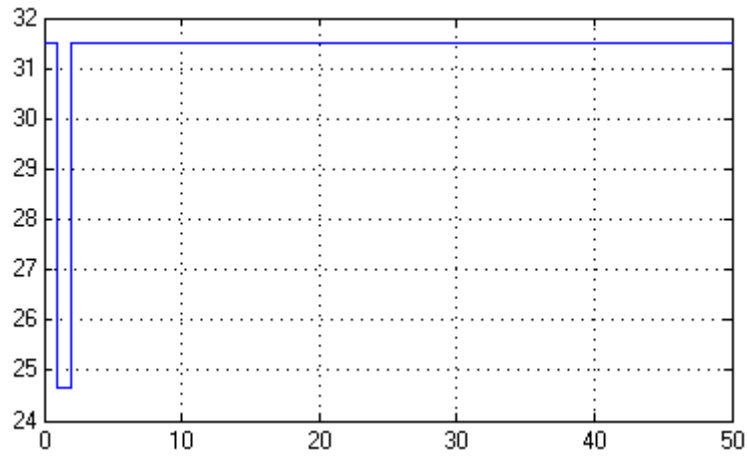
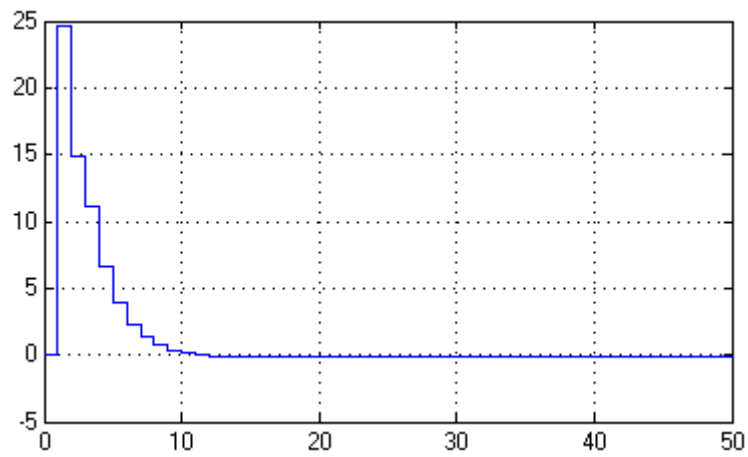


Figure IV-18 : régulation de la température en fonction du temps.

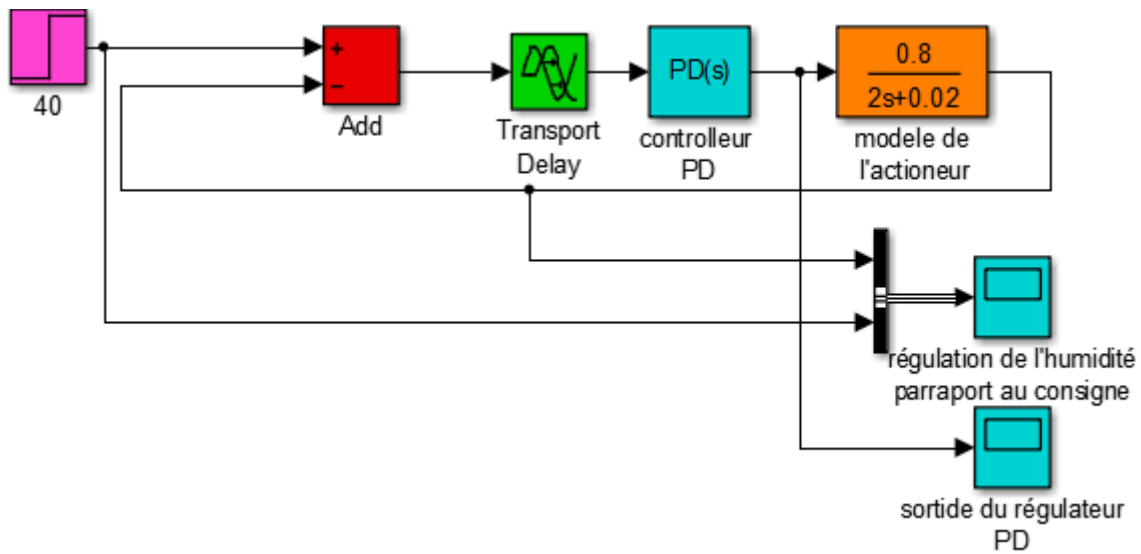


**Figure IV-19 :** l'écart entre la mesure et la consigne en fonction du temps.



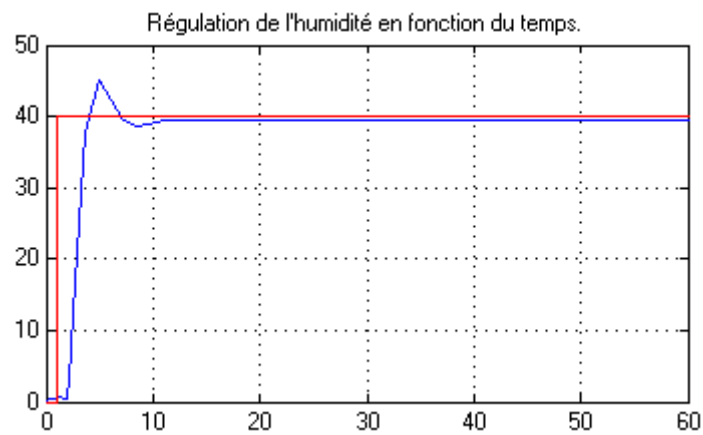
**Figure IV-20 :** couple de régulateur floue.

### IV.7 Régulation de l'humidité de la serre en utilisant un régulateur PD :



**Figure IV-21** : schéma simulink du régulateur PD de l'humidité.

A partir des résultats de la figure 28, 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.



**Figure5.22** : Régulation de l'humidité en fonction du temps.

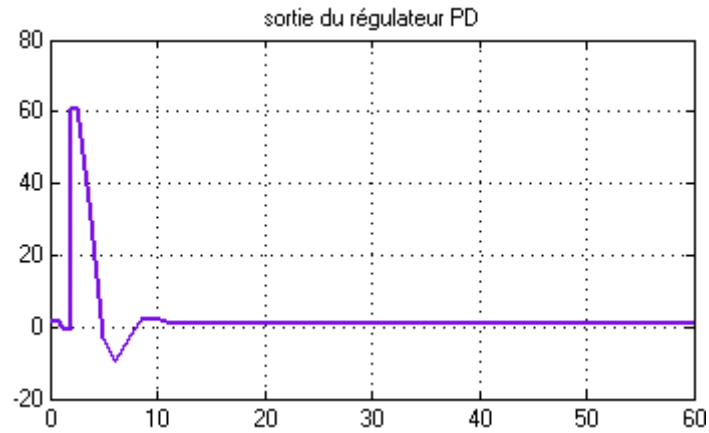


Figure IV-23 : Sortie du régulateur PD.

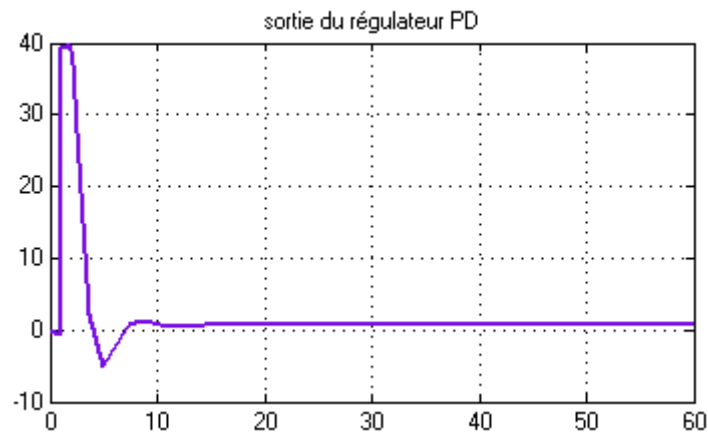
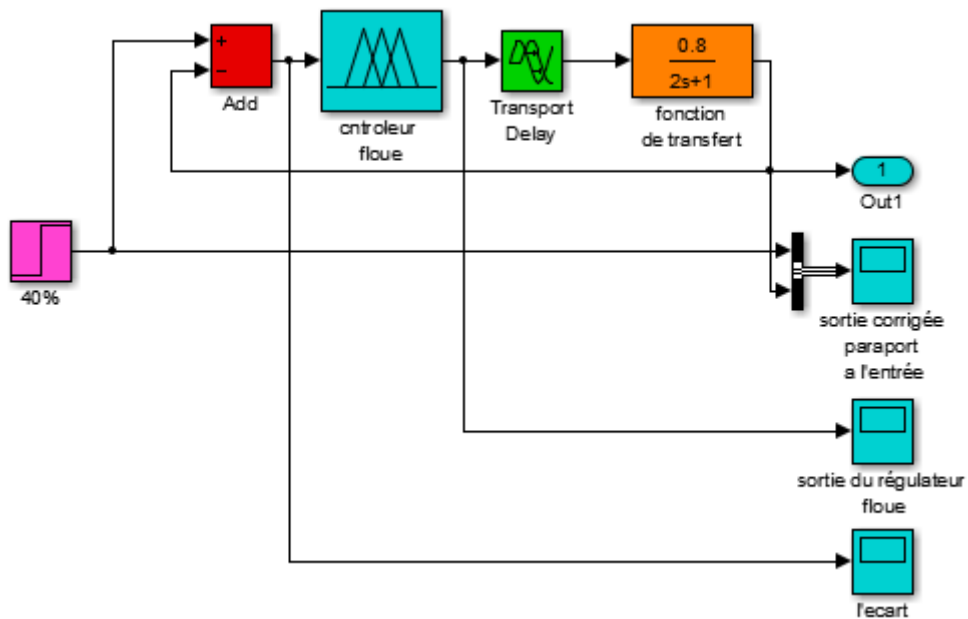


Figure IV-24 : L'erreur en fonction du temps.

**IV.7.1 Contrôle de l'humidité par un contrôleur floue :**



FigureIV-25 : Schéma simulink de régulateur floue de l'humidité.

Pour le réglage de l'humidité, on a choisi la consigne de 40%.

Les variables linguistiques Pour le contrôle de l'humidité.

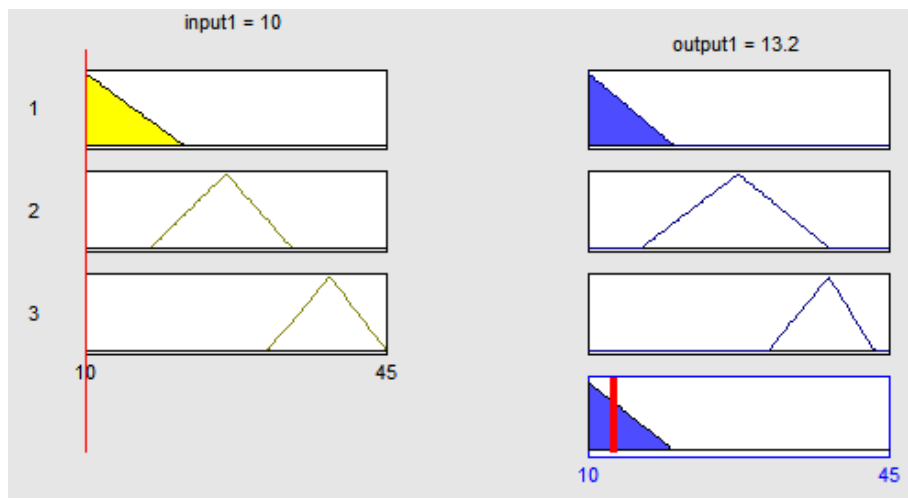
On a considéré les grandeurs suivantes pour les variables de commande :

L'erreur  $\varepsilon$  représente la différence entre la consigne et la sortie réelle.

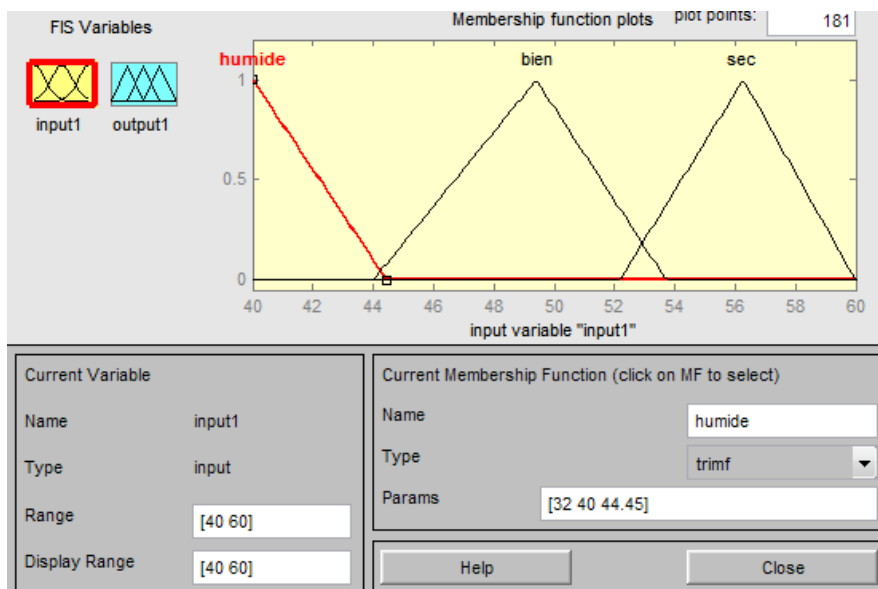
La sortie commande qui représente le ventilateur.

La fuzzification des variables de commande pour le réglage de l'humidité donne les variables linguistiques suivantes :

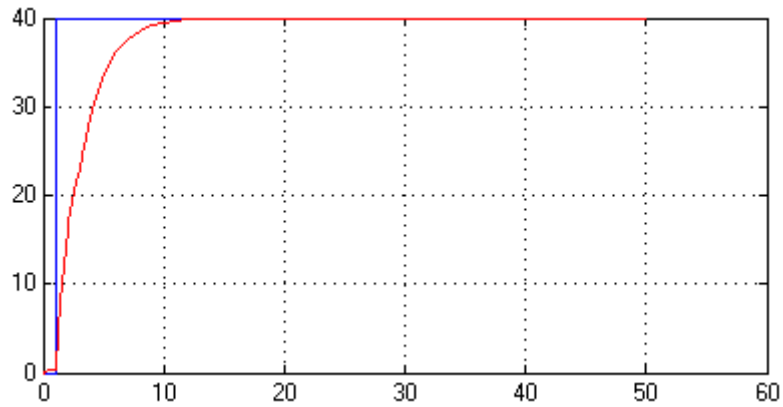
- $H(\varepsilon)$  = (humide, rien (ok), sec)
- $H(\text{commande})$  = (humidification, rien, séchage)



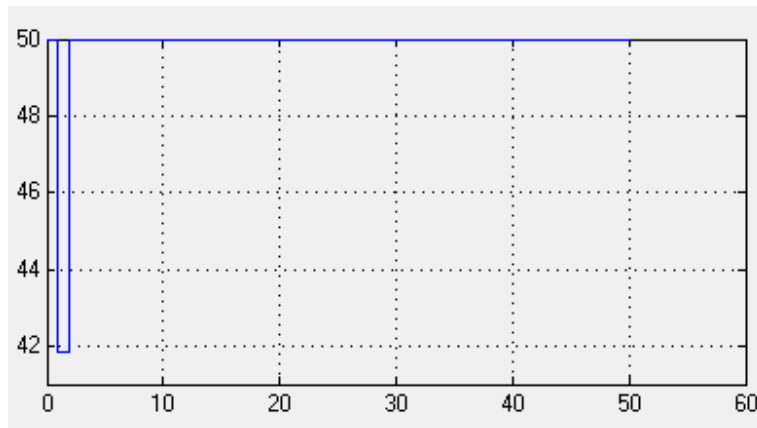
**Figure IV-26 :** variation des sorties de type sugeno par rapport aux entrées floue



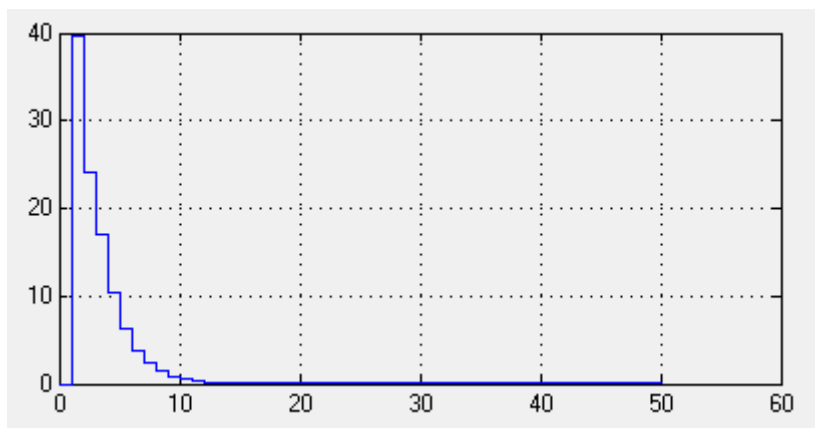
**Figure IV-27 :** schéma de la configuration des entrées et sortie floue sous Matlab.



**Figure IV-28** : sortie du système par rapport au consigne en fonction du temps.



**Figure IV-29** : l'erreur en fonction du temps.



**Figure IV-30** : couple à la sortie du régulateur.

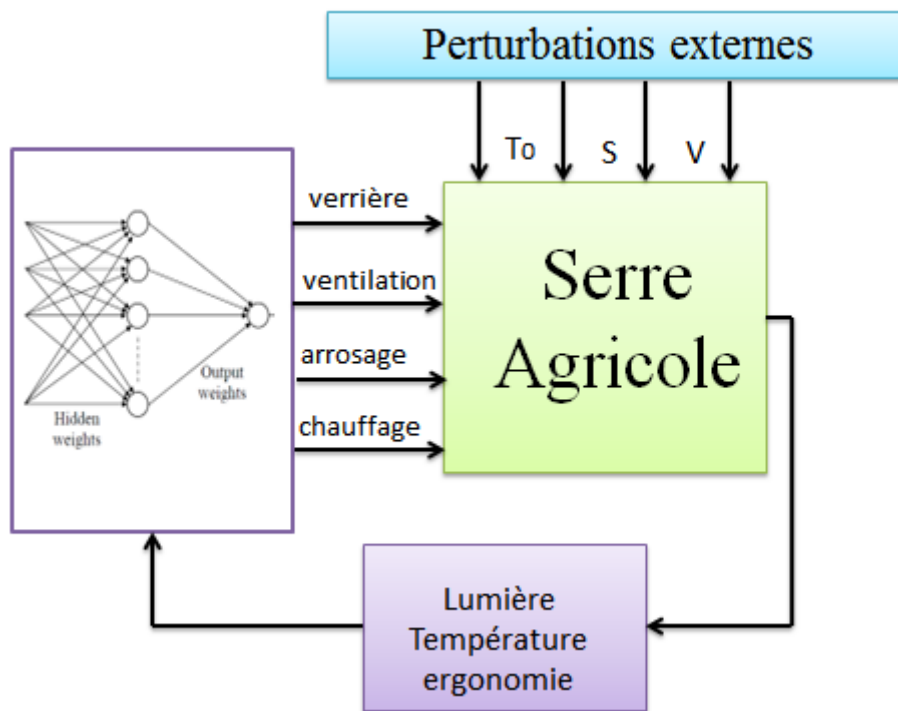
Le contrôleur flou a un caractère non linéaire, son utilisation est alors justifiée pour palier au comportement non linéaire du système.

### IV.8 Comparaison des résultats :

Avec les deux modes de correction, on arrive à des résultats satisfaisants. Cependant, le temps de réponse est plus long avec le contrôleur flou, ceci peut être amélioré en considérant une autre entrée pour le correcteur. Par exemple, on peut considérer la variation de l'erreur, ce qui nécessitera d'autres observations.

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.

### IV.9 Contrôle du climat de la serre avec un réseau de neurone artificiel



**Figure IV-31** : régulation avec réseaux de neurones.

Nous allons "tenter" de simuler l'automatisation d'une serre à l'aide d'un RNA.

Il y aura plusieurs entrées, les capteurs : lumière, température, hydrologie....

Et plusieurs sorties : ventilation, pompe à eau, moteur de verrière, chauffage, arrosage...

Tout cela est de la simulation, il ne faudra pas l'utiliser en vrai car je n'ai aucune compétence en la matière, c'est juste encore une fois l'utilisation des RNA dans la vie concrète qui nous intéresse ici.

Nous allons définir les règles suivantes :

- nuit +  $< 20^\circ$  = fermeture verrière
- nuit +  $> 20^\circ$  = ouverture verrière
- jour +  $> 20^\circ$  = ouverture verrière
- jour +  $< 20^\circ$  = fermeture verrière
- sec +  $> 20^\circ$  = arrosage
- humide  $> 50\%$  = ventilation
- $< 10^\circ$  = chauffage
- $> 10$  = pas de chauffage

#### IV.9.1 Codage des entrées pour mise à l'échelle (monde réel $\rightarrow$ entrée de neurone) :

- lumière (nuit à jour): -1 à 1 ( $Lech=2/100*L\ %-1$ )
- température (-20 à 60) : -1 à 1 ( $Tech=2/80*(T^\circ+20)-1$ )
- hygrométrie (0 % - 100%) : 0 à 1 ( $Hech=1/100*H\ %-1$ )

#### IV.9.2 Codage des sorties pour mise à l'échelle (sortie de neurone $\rightarrow$ monde réel):

- ventilation à 3 positions (0,1,2) : -1, 0, 1  $Vech=\text{arrondi}(Vs+1)$
- verrière (0 à 100%): -1 à 1  $VERech=(VERs+1)/2*100$
- arrosage à 3 positions (0,1,2): -1,0,1  $Aech=\text{arrondi}(As+1)$
- chauffage pré réglé off/on : -1 / 1  $Cech=\text{arrondi}((Cs+1)/2)$

#### IV.9.3 Diagramme de notre RNA à n neurone cachées 3 / n / 4

3 Entrées, 4 sorties, et  $n$  cachées

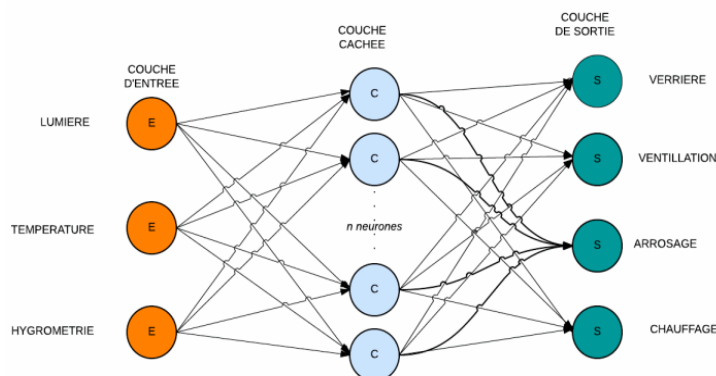


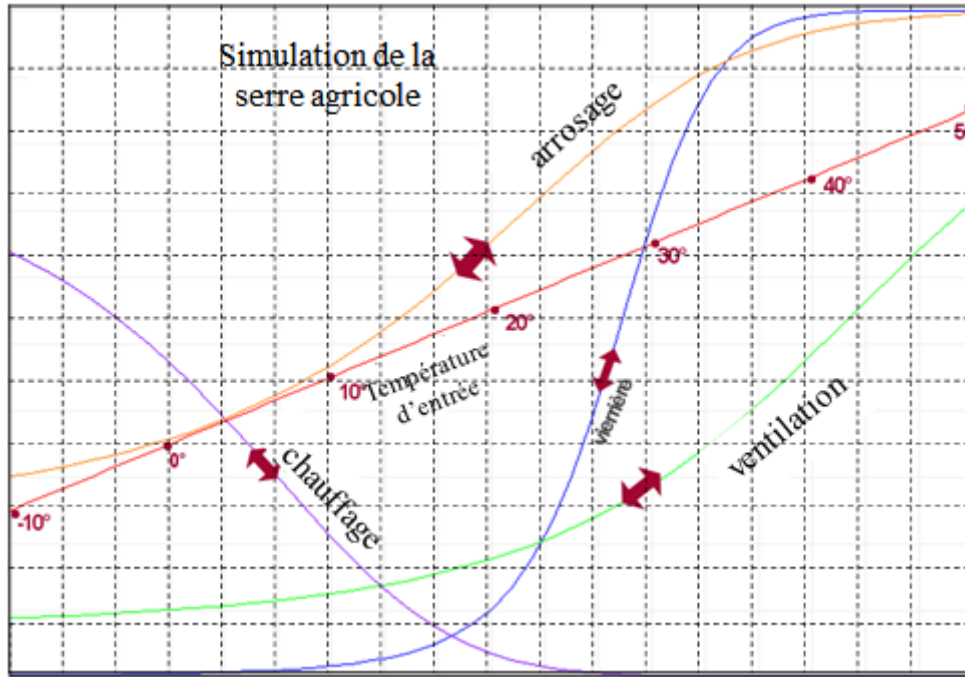
Figure IV-32 : réseau de neurone avec 3 entrées, et 4 sorties

**Tableau IV.1 : les données d'entrée/sortie pour l'apprentissage**

Lumière jour/nuit	Température °c	Hygrométrie %	Verrière	Ventilation	Chauffage	
					Eteint	Allumé
0	-10	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1	0
0	10	0	0	0	1	1
0	20	0	0	0	0	1
0	30	0	1	1	0	1
0	40	0	2	1	0	2
0	50	0	2	2	0	2
1	-10	0	0	0	1	0
1	0	0	0	0	1	0
1	10	0	0	0	1	0
1	20	0	0	0	0	1
1	30	0	1	1	0	1
1	40	0	1	1	0	2
1	50	0	1	1	0	2
0	-10	50	0	0	1	0
0	0	50	0	0	1	0
0	10	50	0	0	1	0
0	20	50	0	0	0	0
0	30	50	1	1	0	0
0	40	50	2	2	0	0
0	50	50	2	2	0	0
1	-10	50	0	0	1	0
1	0	50	0	0	1	0
1	10	50	0	0	1	0
1	20	50	0	1	0	0
1	30	50	1	1	0	0
1	40	50	1	2	0	0
1	50	50	1	2	0	0

Si on doit programmer ceci en classique, ça donnerai pas mal de conditions "if" avec des tranches. Même si d'après le tableau on pourrait réduire et faire des groupements. On peut parfois tomber des données très hétérogène avec plus d'entrées et plus de sorties, et la ça devient chevauché.

Voici le résultat, avec un réseau de neurones à 32 couches cachées.



**Figure IV.33** : résultats des actionneurs par rapport aux entrées.

```
//////////////////// CODE PHP //////////////////////
```

```
$ann = fann_create_from_file(dirname(__FILE__) . "/serre.net");
```

```
// lumiere, temperature, hygrometrie
```

```
$entree[0]=1; // jour
```

```
$entree[1]=2/80*($temperature_en_degree +20)-1;
```

```
$entree[2]=-1; // 0° humidité
```

```
$resultat=fann_run ( $ann ,$entree);
```

```
$ventilation=round($resultat[0]+1); //ventilation à 3 positions (0,1,2) : -1 ,0, 1
```

```
Vech=arrondi(Vs+1)
```

```
$verriere=(( $resultat[1]+1)/2)*100; //verrière (0 à 100%): -1 à 1 VERech=(VERs+1)/2*100
```

```
$chauffage=round($resutat[2]+1); //arrosage à 3 positions (0,1,2): -1,0,1  
Aech=arrondi(As+1)  
$arrosage=round(($resutat[3]+1)/2); //chauffage pré réglé off/on : -1 / 1 Cech=  
arrondi((Cs+1)/2)  
//////////////////////////////////// C O D E   P H P //////////////////////////////////////
```

#### IV. 10 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.

# Conclusion Générale

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.

L'utilisation de contrôleurs classiques dont la configuration ne répond plus à nos attentes, ni à la régulation climatique optimale, mais plutôt comme appoint dans certaine mesure à la technique de l'intelligence artificielle, facilement maniable, à la portée du serriste et qui se caractérise par sa fiabilité et sa robustesse dans la gestion climatique optimale. Les avantages de la commande floue doivent être énumérés et traités sans ignorer les approches conventionnelles de l'automatique classique. Tout ceci implique la recherche d'un compromis entre la complexité, l'expérience humaine, la maîtrise des systèmes, le réalisme des modèles, le mode de configuration, et la robustesse de la méthode de commande pour des performances prédictives. Il faut noter, que construire des modèles fiables et des méthodes de commande pratiques, robustes ne sont pas limitées par l'outil informatique et / ou numérique, mais plutôt par notre connaissance et maîtrise de la dynamique de l'écosystème et son impact sur la gestion climatique optimale du système-serre. On en déduit par là qu'on est plutôt limité par la nature et la qualité des informations sur l'écosystème et son environnement et par la reproduction fidèle de ces informations pour la prise de décision. Nous restons optimistes

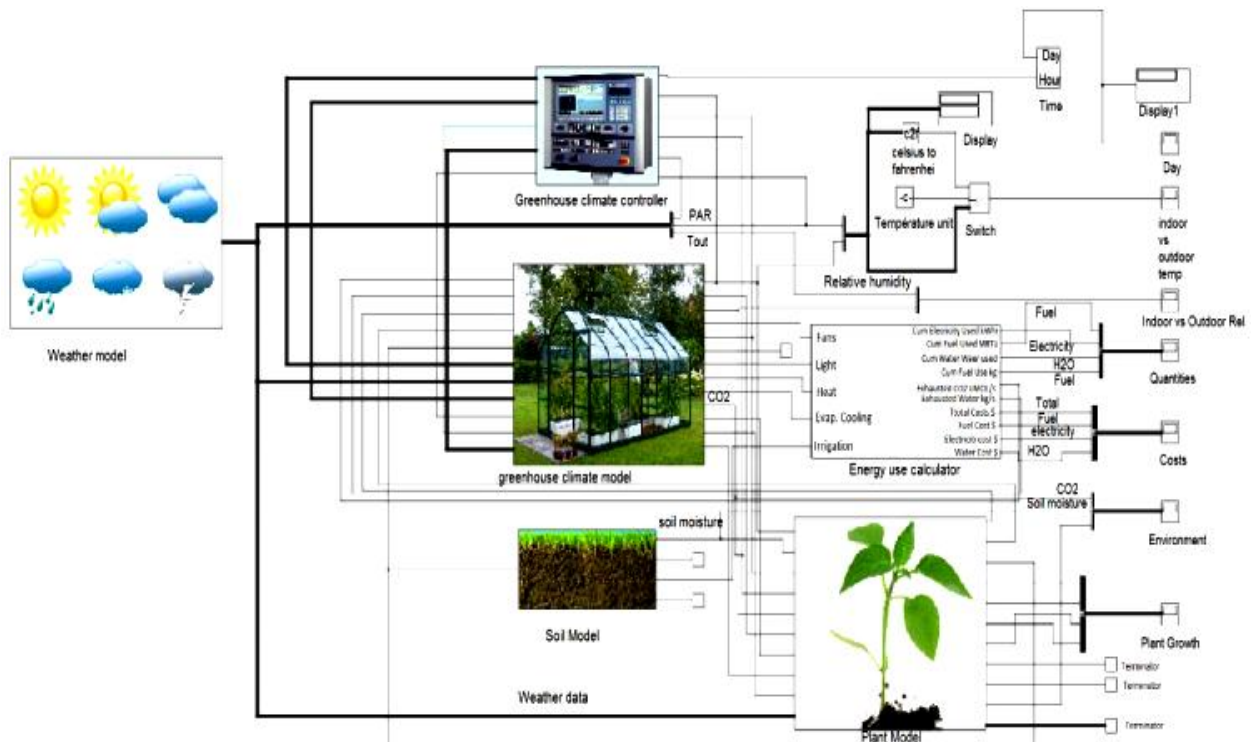
## Conclusion Générale

dans un avenir proche, quant à l'utilisation de la technique de l'intelligence artificielle et sa branche logique floue, qui se signale par :

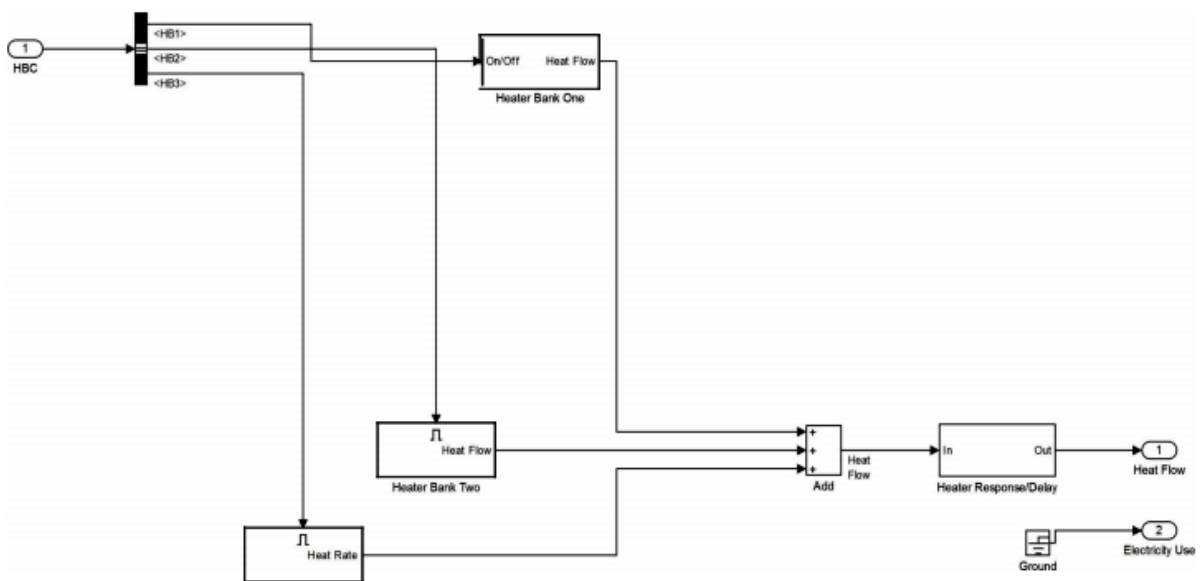
- 1) L'optimalité du contrôle et de la régulation climatique
- 2) L'efficacité d'exploitation de la réserve énergétique due à l'effet de serre.

Quant aux perspectives, elles sont nombreuses. L'application de l'intelligence artificielle était réservée surtout aux domaines de l'industrie, de la robotique et notamment dans l'industrie agroalimentaire, alors qu'elle peut intervenir dans la gestion de plusieurs systèmes et procédés non ou peut abordés jusqu' à ce jour. Nous proposons dans notre domaine de promouvoir ces techniques pour multiplier les saisons et rentabiliser l'exploitation de nos terres agricoles, et l'intégration de la partie commande de la serre.

# Annexe



**Figure 1:** Schéma Simulink représente notre modèle global de la serre.



**Figure 2:** Représentation Simulink du modèle des systèmes de chauffage.

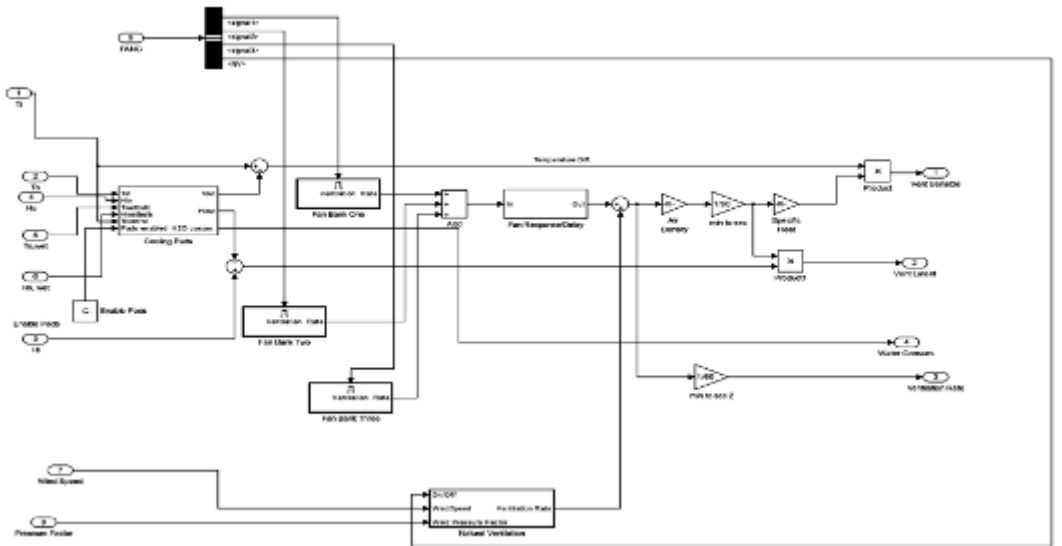


Figure 3 : Représentation Simulink du modèle des systèmes de brumisation

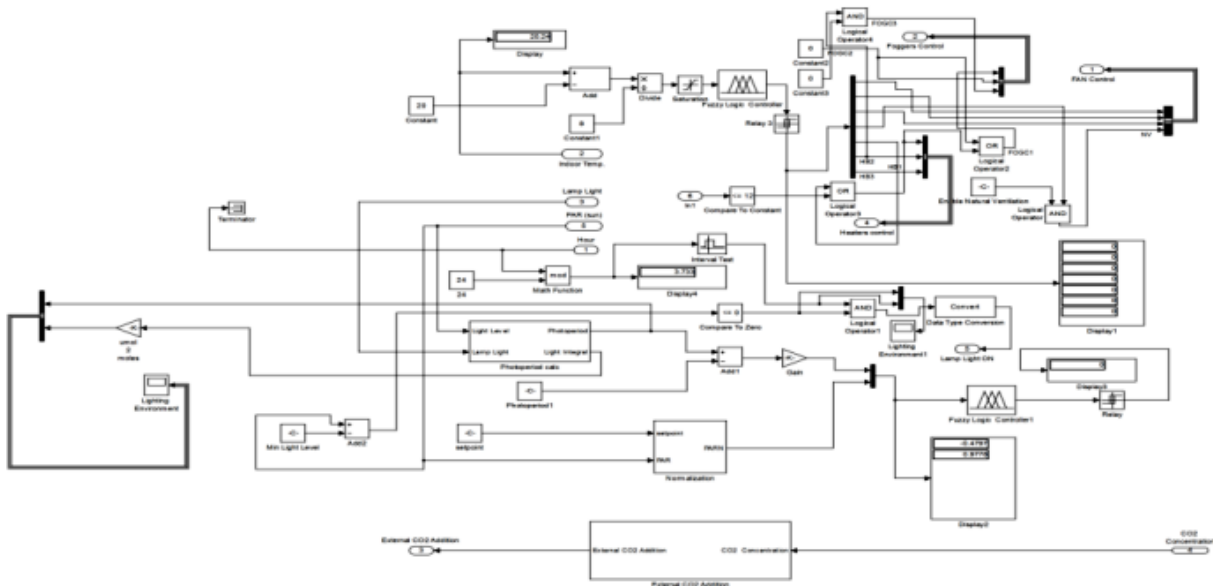


Figure 4 : schéma Simulink représente notre contrôleur flou

# Bibliographie

- [1] [http://www.iai.heigvd.ch/cours/regulation\\_automatique.pdf](http://www.iai.heigvd.ch/cours/regulation_automatique.pdf)
- [2] Cours « Systèmes Asservis Linéaires Continus (SALC) », E420, 4ème année Electronique, ESPA, année universitaire 2005/2006
- [3] BAHLY « Boucles de régulation » 2ème édition 1990
- [4] Hansruedi Bühler « Réglage par logique floue » Presse polytechnique Romande 1994
- [5] Cours « Représentation dans l'espace d'état des systèmes linéaires », E510, 5ème année, Electronique, ESPA, année universitaire 2006/2007
- [6] [http://www.iai.heigvd.ch/cours/poly\\_re.pdf](http://www.iai.heigvd.ch/cours/poly_re.pdf)
- [7] A. Benatlallah, "Etude des Performance d'une Installation Photovoltaïque", Magister, Univ. Tlemcen, 1994.
- [8] H. Majdoubi, T. Boulard, H. Fatnassi, L. Bouirden. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (2009) 1050-1062.
- [9] Ahmed M. Abdel-Ghany, Toyoki Kozai. Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renewable Energy* 31 (2006) 1521-1539.
- [10] Bougoul, S., Soudani, A., Messaoudi, L. Caractérisation et modélisation du climat sous serre. *Projet de recherche, Comité national d'évaluation et de programmation de la recherche universitaire. Rapport annuel 2005.*
- [11] K. Mesmoudi, A. Soudani, B. Zitouni, P.E. Bournet, L. Serir. Experimental study of the energy balance of unheated greenhouse under hot and arid climates: Study for the night period of winter season. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences* (2010) 9, 27–37.
- [12] Charly Cornu « Centrales photovoltaïques (Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs) », office fédéral des questions conjoncturelles, 1996.
- [13] M. Kenane, S. Sadoudi « Modélisation de modules photovoltaïques en milieu réel d'implantation », Mémoire de Master II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2013.

## Bibliographie

[14] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[15] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.

[16] Belaiche Hacene, Nanouche Yacine « Etude d'une installation en énergie photovoltaïque intégrée au bâtiment : cas d'un laboratoire au CDER ». Mémoire de maîtrise II, département de génie mécanique, faculté du génie de la construction, UMMTO 2014.

[17] Sylvain Brigand « Installations Solaires Photovoltaïque (dimensionnement de l'installation et mise en œuvre maintenance) », Edition le moniteur (Paris), février 2011

[18] Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de Captage Photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar, Institut des Sciences Exactes, 2008. [24] Cours sonelgaz « l'énergie solaire photovoltaïque », documentation SKTM, Ghardaïa