



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
STERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT LMD

Spécialité : *Energies Renouvelables*

Par :

Mr DIDI Faouzi

Sur le thème

Optimisation de la gestion du microclimat de la serre par l'introduction de l'intelligence artificielle

Soutenu publiquement 02 /10/2018 devant le jury composé de :

Mr B. BENYOUCEF	Professeur Université de Tlemcen	Président
Mr N.E BIBI TRIKI	Professeur Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr N.E CHABANE SARI	Professeur Université de Tlemcen	Examinateur
Mr A.BOUHDJAR	Professeur Directeur de recherche C.D.E.R Alger	Examinateur
Mr R.BENZEGUIR	Professeur Université d'Oran	Examinateur
Mme K.RAHMOUN	Professeur Université de Tlemcen	Examinatrice

*Unité de recherche des matériaux et des énergies renouvelables
(U.R.M.E.R) BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

Dédicaces

*Avec l'aide de Dieu, le tout Puissant et Miséricordieux
et que le salut soit sur son prophète, porteur de lumière
et du savoir je dédie ce modeste travail :*

*A tous les scientifiques et chercheurs
qui donnent leur vie pour la science et le progrès.*

A tous ceux qui travaillent pour le bien être et la prospérité de l'humanité

A tous ceux qui ont trouvé le moyen d'y remédier en inventant

*La serre, les équipements qui l'accompagnent,
les procédés de régulation, de contrôle, de commande
et de l'exploitation de la théorie de l'intelligence artificielle etc.*

A tous ceux qui œuvrent à l'autosuffisance alimentaire

A tous ceux qui œuvrent et protègent les enfants contre la famine

Ce travail leur est dédié

*Il est aussi dédié à ma très chère mère, pour tous les efforts et sacrifices,
qu'elle a dû consentir pour mon devenir.*

Vous méritez infiniment plus.

FAOUZI DIDI

Remerciements

Derrière ce modeste travail, se cache la présence morale d'un modeste pédagogue et scientifique, qui n'est que mon directeur de thèse de doctorat Monsieur le professeur N.BIBI-TRIKI, que je dois remercier vivement j'ai particulièrement apprécié ses conseils, ses orientations et sa pleine disponibilité pour répondre à toutes mes interrogations et préoccupations malgré la distance qui nous sépare. Je lui suis aussi reconnaissant pour m'avoir sensibiliser sur l'importance de la production scientifique et du devoir sacré d'un chercheur. J'ai envie de lui dire Merci de bon cœur.

Je suis profondément honoré que Monsieur B.BENYOUCEF Professeur de l'Université de TLEMCCEN, ait accepté d'examiner ce travail et présider ce jury.

Que monsieur N.CHABANE SARI Professeur de L'Université de TLEMCCEN, Monsieur A.BOUHDIJAR Directeur de Recherche au CDER D'Alger, Monsieur BENZEGUIR REDOUANE Professeur en Génie-Mécanique à L'USTO et Madame K. RAHMOUNE Professeur de L'Université de TLEMCCEN, qui m'a encouragé, guidé et orienté; trouvent tous ici l'expression de mes sincères remerciements et ma très haute considération pour avoir accepté d'examiner et expertiser ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur L'Ingénieur Khaled BELHOUT qui m'a soutenu et aider grandement dans le domaine de l'informatique, à mes amis Wizdadi Abdelkader , Boukada Ali , Miloud Mazhoud, Matmoura Mohamed, Achour, Messaouden Bilel, Rezig Hamza, Ismail et Amine King, Sofiane , Abbes, Mansouri Mokhtar , S. Hadjdj, Nabila Guendouz et sa famille , Zidani Chafika Dr. Mohammed Bentchikou et à tous ceux qui m'ont encouragés et ont apportés une aide matérielle ou morale.

En dernier je ne saurais oublier de remercier ma famille Chaher ,Yacine, Kamel, Rafik, Nabila, Ouarda , Souheib, Raouf et mon Père , notamment ma chère mère Kheira qui m'a supportée en faisant de grands sacrifices.

FAOUZI DIDI

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<i>Chapitre (I): Généralités sur les serres agricoles</i>	
D) Serre agricole.....	6
I.1) Avantages de la production sous serre.....	6
I.2) Description de la serre et de son microclimat.....	7
I.2.1) Les serre tunnels.....	7
I.2.2) Les serres d'horticultures.....	8
I.2.3) Composantes d'une serre.....	8
A) L'ossature (armature)	9
B) Les matériaux de couverture.....	9
a) Le verre.....	9
b) Matériaux en plastique	10
c) Autres types de matériaux de couverture.....	10
d) Caractéristiques principales des divers matériaux de couvertures.....	11
I.2.4) Les différents types de serre.....	13
I.2.5) Caractéristiques d'une serre.....	15
A) Les paramètres climatiques dans une serre.....	15
a) Lumière.....	16
b) Température.....	16
c) Humidité.....	17
d) Teneur en gaz carbonique.....	18
B) Orientation de la serre.....	18
I.3) Besoins des plantes.....	18
I.3.1) La photosynthèse.....	18
I.3.2) La respiration.....	19
I.3.3) La transpiration.....	19
I.4) Effet de serre.....	20
I.5) Energies d'appoint aux serres.....	21
I.6) Mouvements de l'air.....	21
I.7) Aération.....	21
I.8) Échanges thermiques.....	23
I.8.1) Echanges radiatifs.....	23

A) Rayonnements de courtes longueurs d'onde.....	23
B) Rayonnements de grandes longueurs d'onde.....	24
I.8.2) Les échanges convectifs.....	24
A) Convection libre.....	24
B) Convection forcée	25
C) Convection mixte.....	25
I.8.3) Échanges conductifs.....	25
I.9) Composantes climatiques essentielles de la serre.....	26
I.9.1) Capteur de température.....	26
I.9.2) Capteur d'humidité.....	26
A) Hygromètres résistifs	27
B) Hygromètres capacitif.....	27
C) Équipements de régulation.....	27
1) Chauffage.....	26
2) Ventilation.....	27
3) Humidification.....	29
4) Déshumidification.....	29
<i>Chapitre (II): Notions sur l'intelligence artificielle</i>	
II. Systèmes de la commande intelligente (SISO et MIMO)	33
II.1) Aspects particuliers de l'informatique pour la culture en serre.....	35
II.2) Techniques du contrôle du climat de la serre.....	36
II.2.1) Contrôle Classique.....	37
II.2.2) Contrôleurs de rétroaction pseudo-dérivés.....	39
A) Structure du contrôleur.....	39
B) Contrôle intelligent en temps réel.....	41
a) Systèmes de logique floue et leurs applications.....	43
1) Ensembles flous et logique floue.....	43
2) Architecture des systèmes de la logique floue.....	44
II.2.3) Systèmes de logique floue en contrôle.....	49
A) Systèmes statiques de la logique floue.....	49
B) Systèmes adaptatifs de la logique floue.....	50
II.2.4) Caractéristiques et applications des systèmes de logique floue.....	50
II.2.5) Contrôle adaptatif.....	51
II.2.6) Réseaux de neurones sur les systèmes de serres.....	52

A) Réseaux de neurones feedforward.....	53
a) Perceptron multicouches.....	53
b) Apprentissage des réseaux neuronaux.....	54
1) Apprentissage supervisée.....	54
2) Apprentissage par renforcement.....	55
3) Apprentissage non supervisée.....	55
B) Applications des réseaux neuronaux feedforward.....	55
II.2.7) Techniques modernes d'optimisation.....	56
A) Algorithmes génétiques.....	56
B) Principales attractions des algorithmes génétiques.....	58
1) L'indépendance du domaine.....	58
2) Non linéarité.....	58
3) Robustesse.....	59
4) Facilité de modification.....	59
5) Multi-objectivités.....	59
II.3) Avantages et inconvénients de la logique floue des réseaux de neurones.....	59
II.4) Identification floue.....	60
II.5) Conclusion.....	61
 <i>Chapitre (III): Modélisation et simulation climatique intelligente du système-serre</i>	
III.1) Principes de base.....	64
III.2) Hypothèses simplificatrices principales et Modélisation de la serre.....	65
III.3) Hypothèses simplificatrices principales.....	66
III.4) Modélisation de la serre.....	67
III.4.1) Modèle de Bilan thermique.....	68
III.4.2) Variables de l'état.....	71
A) Couverture.....	71
B) Volume d'air au-dessus de l'écran.....	72
C) Ecran.....	73
D) Air.....	74
E) Canopée.....	75
F) Sol.....	75
G) Couches du sol.....	75
H) Les tuyaux en croissance.....	76

D) Tuyaux inférieures du système de chauffage.....	76
III.4.3) Modèle de radiation solaire.....	77
III.4.4) Modèle de rayonnement infrarouge.....	78
A) Couverture.....	79
B) Écran.....	79
C) Canopée.....	79
D) Sol.....	80
E) Les tuyaux en croissance.....	80
F) Tuyaux inférieures du système de chauffage.....	80
III.4.5) Modèle du bilan massique de la serre.....	80
III.4.6) Modélisation des systèmes serre.....	82
A) Systèmes de chauffage.....	82
a) Tuyaux en croissance.....	82
b) Système de chauffage inférieur.....	82
B) Systèmes de refroidissement.....	83
a) Ventilation naturelle.....	83
b) Ventilation mécanique.....	83
C) Système de brouillard.....	84
III.4.7) Organisation du modèle.....	85
III.4.8) Simulation et validation du modèle.....	87
III.5 Modélisation du contrôleur flou.....	94

Chapitre (IV): Résultats de simulations

IV.1) Résultats de simulation Pour la région humide (Dar EL Beida).....	102
IV.2) Résultats de simulation Pour la région aride de Biskra.....	105
IV.3) Discussions des résultats.....	107
• CONCLISON GENERALE.....	110
• NOMENCLATURE.....	113
• LISTE DES FIGURES.....	115
• LISTE DES TABLEAUX.....	117
• BIBLIOGRAPHIE.....	119
• Résumé.....	131

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 de conduite climatique sont apparues, parmi lesquelles l'emploi d'appareils de régulation, allant du classique à l'application de l'intelligence artificielle, désormais connue sous l'appellation de réseaux de neurones et / ou logique floue etc. La climatisation des serres modernes, permet de maintenir les cultures sous abris dans des conditions compatibles avec les objectifs agronomiques et économiques. Les serristes optent pour la compétitivité. Ils doivent optimiser leurs investissements, dont le coût devient de plus en plus cher. La serre agricole, peut être rentable dans la mesure où sa structure est améliorée,

les matériaux des parois bien choisis, selon la nature et le type de la production, les installations techniques et équipements d'accompagnement doivent être judicieusement définis. De nombreux équipements et accessoires sont apparus pour réguler et contrôler les variables d'état tels que la température l'humidité relative, la concentration en CO₂ etc. Actuellement les ordinateurs climatiques des serres, résolvent les problèmes de régulation et veillent au respect des consignes climatiques exigées par les plantes. Désormais l'ordinateur climatique est un outil de gestion dynamique de la production, capable de choisir l'itinéraire climatique le plus approprié, pour répondre aux objectifs tracés, tout en minimisant les intrants

L'approche globale des systèmes-serres se profile comme suite ;

- Aspect physiologique ; Ce domaine relativement complexe et insuffisamment développé, exige une prise en charge totale et un traitement scientifique et expérimentale poussé, Ceci permet de caractériser le comportement de la plante pendant son évolution, depuis la croissance jusqu'à son développement final ; Ceci nous permet aussi d'établir un modèle de fonctionnement opérationnel
- Aspect technique : Le système-serre, est soumis à un nombre important de données, de décisions et d'actions à mener sur l'environnement climatique immédiat de la plante (température, hygrométrie, enrichissement en CO₂, brumisation etc...).La complexité de la gestion de cet environnement, nécessite une approche analytique, numérique, informatique, et opérationnelle du système.
- Aspect socio-économique :L'évolution sociale, se légitimera par une demande exigeante et pressante de produits frais tout au long de l'année; Cet état de fait, entraîne tous les opérateurs socio-économiques, de s'inscrire dans une dynamique scientifique, technologique et de buisines. Cette dynamique exige un professionnalisme élevé.

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 CO₂ etc.) depuis le classique Jusqu'à l'exploitation de l'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones et ou /logique floue (Didi Faouzi, et al, 2016)

Actuellement l'ordinateur climatique offre de multiples prestations et permet de résoudre les problèmes relatifs à la régulation, au contrôle et aux commandes

L'automatique non linéaire ne dispose pas de solutions universelles ni pour l'analyse des systèmes ni pour la conception de leurs contrôleurs (Hamid Ouakka, 2009). L'analyse et la commande de ces systèmes ne sont pas, toujours, des tâches faciles.

La plupart des travaux existants dans la littérature proposent des approches qui sont, généralement, limitées à des formes bien particulières de systèmes (Chaoui *et al.*, 2000, 2001).

De nombreux systèmes et procédés de contrôle pratiques ont des caractéristiques dynamiques complexes, comme la non-linéarité, l'incertitude ou les changements dans la dynamique des processus. Ces caractéristiques ne sont pas entièrement comprises, comme c'est le cas dans la plupart des systèmes de contrôle des procédés industriels (Babushka & Mamdani, 2008). L'incertitude se produit pour diverses raisons, par exemple, le manque de connaissances ou l'impossibilité d'obtenir les paramètres requis d'un système. Il en résulte une compréhension imprécise de la dynamique du système et, par conséquent, le processus de capture et de la modélisation des caractéristiques et des attributs dans les modèles mathématiques devient trop compliqué (Babuska et Mamdani, 2008). En outre, les systèmes de contrôle étant de plus en plus contraints de s'adapter à d'autres capacités et fonctionnalités, telles que l'autonomie et les capacités intelligentes de prise de décision, ces systèmes ont tendance à devenir de plus en plus compliqués, et par conséquent, le processus de modélisation devient plus complexe.

Dans le monde réel, la compréhension de certains systèmes complexes ne nécessite pas un niveau élevé de précision. De tels systèmes et procédés complexes peuvent être intuitivement contrôlés par les humains. Un opérateur humain qualifié peut comprendre et modéliser le comportement de ces systèmes et les maîtriser sans avoir une connaissance précise de leurs modèles mathématiques (Mamdani, 1974).

L'application de l'intelligence artificielle dans l'industrie à connue 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 (Didi Faouzi, et al, 2016), pour enfin analyser le comportement thermo-énergétique du microclimat de la serre. Dans notre travail on a définis un contrôleur intelligent tel que la logique floue (FLC) en utilisant la méthode de Mamdani (Mamdani &Assilia , 1975; Zadeh, 1996).

La méthode de contrôle par la logique floue (FLC) (Mamdani et Assilian, 1975; Zadeh, 1996), est comme une méthode alternative aux techniques de contrôle classiques, elle repose sur une approche empirique plutôt que sur une connaissance explicite et précise du modèle mathématique d'un système. Ce nouveau model de contrôle est apparu comme l'une des techniques intelligentes les plus utilisées pour aborder les complexités associées à certains

systèmes. Depuis lors, on a signalé un emploi toujours croissant de contrôleurs par la logique floue, ils ont été appliqués avec succès dans les processus industriels et, dans certains cas, ont surpassé les contrôleurs PID (Bakhtiar I, 2014). La raison principale en est que FLC est considérée comme une méthode systématique pour intégrer les connaissances humaines dans la compréhension, la modélisation et le contrôle d'un processus sous forme de termes linguistiques à un contrôleur. Par conséquent, le contrôleur flou émule les humains et devient intelligent.

Ainsi, avec l'environnement contrôlé dans la serre il est possible d'augmenter la qualité et la quantité de produits des cultures par unité de terre exploitable dans un temps minimum possible. L'automatisation en serre est très importante pour une gestion réussite des cultures en serre (ZHOU Xiaobo, et al, 2009; R. Caponetto, et al, 1998). Le contrôle flou (FLC) a été appliqué dans les contrôles et la gestion du microclimat de la serre agricole. Il est aussi très robuste, et par cette méthode, on peut facilement modifier et utiliser plusieurs entrées et sorties. Il est beaucoup plus simple que ses prédécesseurs (équations algébriques linéaires), il est rapide dans l'exploitation et moins cher à mettre en œuvre.

Dans notre travail on a développé et modélisé un contrôleur par la logique floue avec le MATLAB SIMULINK. La modélisation floue présente certains avantages distinctifs, comme le mécanisme de raisonnement en termes compréhensibles par l'homme, la capacité de prendre des informations linguistiques auprès d'experts humains et de les combiner avec des données numériques. La simulation a été faite sur une base de donnée des deux zones différentes (Dar el Beida et Biskra) l'une est humide et l'autre aride. Les travaux de recherche effectués sur le système serre se réfère au modèle Simulink de (Jamison M.Hill, 2006) et sur les modèles dynamiques existant dans la littérature, et qui ont été utilisés pour la validation de notre contrôleur.

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 –hydrique et énergétique qui se produisent en son sein.

Deuxième chapitre : Pour le deuxième chapitre on a fournit 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, où on a mis

l'accent sur le modèle du contrôle par l'application de la logique floue, d'après la méthode de Mamdani.

Troisième 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 (FLC), suivi par l'établissement d'une base de données réelle des deux régions (Dar El Beida et Biskra) en utilisant le MATLAB SIMULINK.

Quatrième chapitre : Ce chapitre est consacré essentiellement aux résultats de la simulation climatique de deux microclimats ; l'un dans une région humide, l'autre dans une zone aride, suivi de discussions, commentaires, le tout couronnée par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

Généralités sur les serres agricoles

I) Serre agricole

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. IL est bien connu "effet de serre", que le sol et les plante situés 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 physique 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 solaire. 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.1) Avantages de la production sous serre

La température intervient de façon prépondérante dans la croissance et le développement de la végétation, L'humidité augmente dans les serres grâce à la transpiration de la plante, en l'absence de vent et par évapotranspiration en enceinte relativement close. Les concentrations de CO₂ et de vapeur d'eau, jouent un rôle déterminant dans la transpiration et sur la photosynthèse des plantes ainsi que dans le développement des maladies fongiques. Le rayonnement solaire intervient également dans la photosynthèse.

Un contrôle bien maîtrisé du bilan énergétique/massique du climat permet donc de gérer ces paramètres et d'améliorer le fonctionnement physiologique des plantes.

Dans cette étude bibliographique, nous exposons les caractéristiques et les conditions climatiques d'une serre ainsi que l'étude de différents fondements et outils essentiels pour le pilotage des paramètres climatiques du microclimat. La culture protégée n'obéit pas aux contraintes aléatoires extérieures et elle n'est pas affectée par les problèmes rencontrés dans les cultures en plein champ. Les conditions climatiques aléatoires extrêmes entravent la production, alors que la serre moderne avec ses moyens techniques, répond aux exigences de la croissance et du développement de la plante, tout en réduisant les espaces d'exploitation. Quelques avantages de la serre agricole peuvent être énumérés ci -dessous

- Production et rendement satisfaisant.
- Production hors saisons des fruits, légumes et espèces florales.

- Diminution notable des maladies nuisible aux plantes grâce à la climatisation.
- Exploitation réduite des terres agricoles.
- Qualité et précocité des récoltes.

La serre agricole moderne contribue grandement au développement et à la stratégie future du secteur agricole. Elle s'impose par ses nouvelles technologies et se transforme en une véritable industrie.

I.2) Description de la serre et de son microclimat (Kamel Mesmoudi 2010)

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

I.2.1) Les serre tunnels

En général, la serre tunnel se compose d'une série d'éléments juxtaposés constitués chacune par une armature en tube d'acier et en profilés assemblés par des boulons. La largeur est de (3 à 9) m. Le film plastique se fixe par divers systèmes de clips qui coincent le film contre le profil ou entre deux baguettes tout au long de la serre. La serre tunnel conventionnelle est en forme d'arceau. Il existe également des modèles à pieds droits comme pour les serres en verre, Certaines d'entre elles sont d'ailleurs convertibles pour leurs couvertures (Kamel Mesmoudi 2010).

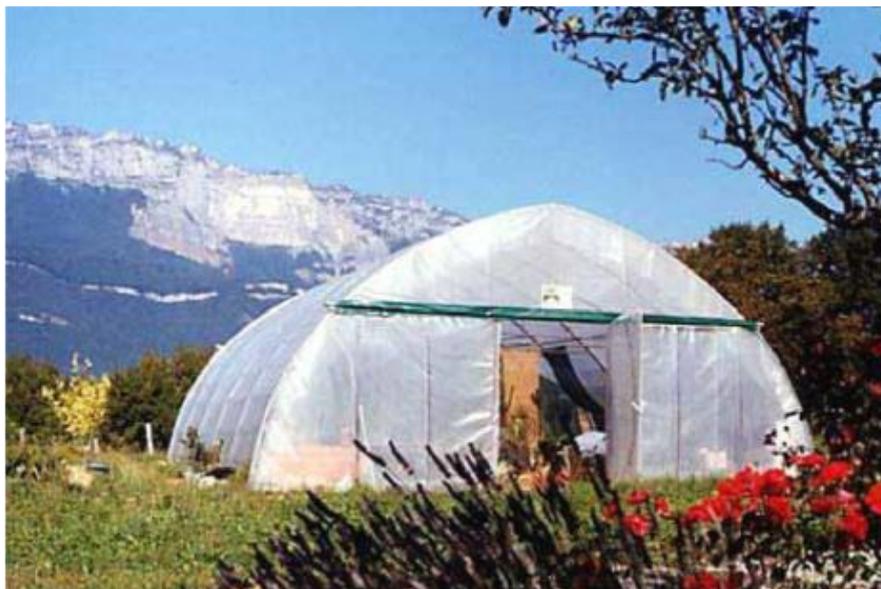


Figure (I.1) : Photo d'une serre tunnel (Kamel Mesmoudi 2010)

I 2.2) Les serres d'horticultures (Kamel Mesmoudi 2010)

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 chapelle est caractérisée par sa largeur, dont les dimensions courantes sont approximativement entre (3, 6, 9,12 et 16m). Quand deux chapelles consécutives ne sont pas séparées par une paroi verticale interne, on parle de serre multi- chapelles ou chapelles jumelées. La ferme est l'élément de structure porteuse principale de la chapelle répétée à intervalles réguliers.

Le module est une surface caractéristique de la serre obtenue en réalisant le produit de la largeur de la chapelle par la longueur de l'entre- fermes ; Les pignons sont des parois verticales formant les deux extrémités d'une chapelle ; Le faîtage est la ligne constituée par le sommet de la chapelle ; Le portique est une structure porteuse, qui existait dans les serres anciennes , il est soutenu par le pieds de ferme et par une poutre joignant les sommets des pieds droits, il y a de moins en moins de serres à portique ; Les pieds droits sont des supports verticaux latéraux d'une chapelle ; la figure ci-dessous, (fig. I.2) permet de retrouver en volume ces différents éléments.

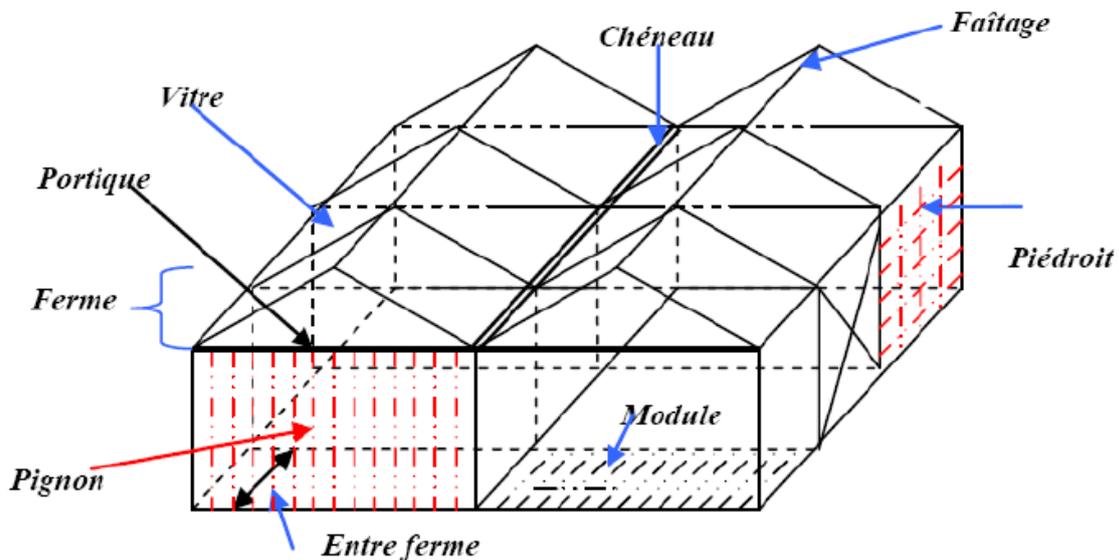


Figure (I.2): Structure d'une Serre d'horticulture constituée de deux chapelles et de trois modules chacune, Waquant (2000) (Kamel Mesmoudi 2010)

I .2.3) Composantes d'une serre

D'une manière générale, la serre est composée de deux structures : une armature (ossature) qui constitue le squelette de l'abri, et une couverture (enveloppe) qui réalise l'écran nécessaire à la création d'un microclimat spécifique à la serre.

A) L'ossature (armature)

C'est la charpente de la serre, qui doit donner la rigidité à l'ensemble de la structure et résister aux charges et à la poussée des vents. Elle peut être réalisée en béton et bois (construction dure), en acier galvanisé ou en acier traité à l'antirouille et en aluminium. Du point de vue de l'ombrage, les dimensions des arceaux, des fermes, des pannes et de tous les éléments constituant la structure en hauteur de la serre, doivent être aussi réduites que possible. Les matériaux les plus adéquats sont l'acier et l'aluminium. Ils ont une résistance élevée. Le bois pour une résistance équivalente, doit avoir des dimensions bien plus grandes et provoque plus d'ombrage.

L'utilisation de l'aluminium ou de l'acier profilé présente d'autre avantage :

- 1) L'emploi d'éléments de structure normalisés.
- 2) Assemblage facile par juxtaposition des éléments.
- 3) Déformation presque inexistante.
- 4) L'usure réduite.
- 5) L'installation dans un temps réduit.
- 6) Frais d'entretien sont minimes sinon inexistants.

B) Les matériaux de couverture

Leurs performances doivent être appréciées à plusieurs niveaux : au niveau de leurs propriétés optiques ; de jour : il s'agit avant tout de présenter la meilleure transmission au rayonnement visible utile à la photosynthèse ; de nuit : il faut que leur émissivité dans l'infrarouge thermique soit la plus faible possible, de manière à limiter les pertes radiatives. Autrement dit au niveau de leurs propriétés thermiques, leurs coefficients de conductibilité et de pertes par conduction doivent être les plus faibles possibles. Il s'agit donc de matériaux opaques aux infrarouges IR. Le coefficient de dilatation du matériau (paroi) doit être faible, pour éviter les problèmes de fuite et pérenniser l'étanchéité du système. Leurs durées de vie et leurs résistances aux intempéries doivent être performantes. Si les propriétés optiques et mécaniques des matériaux de couverture à l'état neufs sont connues, elles ne le sont plus après quelques mois d'utilisation. Le film subit des altérations des propriétés optiques suite à la photo-dégradation et un affaiblissement des propriétés mécaniques qui s'extériorisent sous forme de déchirures, de délaminage etc. En plus de la salissure le vieillissement de la paroi se déclare et se manifeste par un jaunissement de la couverture.

a) Le verre

Du point de vue de la transmission lumineuse, le verre est le meilleur matériau, surtout les verres spéciaux. Son opacité aux rayonnements infrarouges lui permet de maintenir et d'améliorer au mieux l'effet de serre. Son poids et sa fragilité, font que l'emploi de ces panneaux de verre soient coupés en dimensions réduites pour habiller les parois, ce qui entraîne par conséquent un renforcement de la charpente qui génère un peu plus d'ombrage.

La structure doit être très stable et nécessite une fondation rigide. La méthode de pose du verre implique de nombreux joints produisant un calfeutrage imparfait de la serre. Même si le verre est d'une durée quasi illimitée, il faut quand même prévoir un certain taux de remplacement suite aux bris. Le verre n'étant pas un matériau isolant, son utilisation en recouvrement simple laisse place à des pertes de chaleur relatives. L'emploi de verre à faible émissivité permet de réaliser des économies de 20% avec une réduction de la luminosité d'environ 10% alors que l'emploi de verre double (type "thermos") diminue les pertes de chaleur de 40%. Les coûts élevés d'investissement de la serre habillée en verre font qu'elle soit moins adoptée dans les régions méditerranéennes.

b) Matériaux en plastique

L'utilisation de film plastique a permis un grand développement des serres au cours des dernières décennies. Le matériau le plus utilisé est le polyéthylène PE. Il est robuste, flexible et se monte sur une structure légère. Il est disponible en faible épaisseur et en très grande largeur (12m). Sa transparence est élevée dans les domaines spectraux de 0.39 à 39 μ m. Il ne possède pas l'aptitude d'effet de serre sauf traitement spécial ou présence d'un film d'eau condensé sur sa face intérieure, Le PE infrarouge a les mêmes capacités de transparence que le précédent mais ne laisse passer qu'une faible proportion d'infrarouge long, égalant ainsi les propriétés du film PVC, son action diffusante élimine les ombrages directs au sol causés par la structure. La pose facile d'un film de polyéthylène et son faible coût, font de lui le matériau le plus utilisé comme revêtement de serre. La double paroi en polyéthylène soufflée semble la mieux adaptée, mais son incapacité à retenir le maximum de rayonnements infrarouges ne lui confère pas l'effet de serre que possède le verre. Cependant, l'installation d'une double paroi laissant un espace d'air isolant. Permet de réduire d'environ 40% les déperditions de chaleur par rapport à une paroi simple et d'éliminer considérablement la condensation à l'intérieur par rapport à la simple paroi PE. La principale faiblesse du polyéthylène est sa courte durée de vie à cause des problèmes du vieillissement et l'apparition de bris mécaniques. De plus, la présence de salissure provoque une baisse de la transmission lumineuse.

c)Autres types de matériaux de couverture

D'autres revêtements plastiques rigides sont actuellement disponibles. À base de polycarbonate ou de polyméthacrylate, ces matériaux sont disponibles en plus grandes pièces que le verre, les fuites au niveau des joints en sont diminuées et le rayonnement solaire est moins intercepté par la structure. Les coûts très élevés de ces matériaux limitent actuellement leur utilisation qu'aux petites surfaces de culture. Tous les revêtements plastiques sont hautement inflammables. Il faut donc prendre toutes les précautions nécessaires pour éliminer les risques d'incendie. Un dégagement adéquat autour des fournaises et des tuyaux est requis.

d) Caractéristiques principales des divers matériaux de couvertures

A titre complémentaire, on trouvera sur le tableau (I.1), des ordres de grandeurs de quelques caractéristiques principales des différents matériaux utilisés en couverture de serre (N. BIBI-TRIKI). Une mise à jour de ce tableau est indispensable.

Une approche globale des matériaux de couverture nous amène à relever certaines constatations relatives à leur utilisation, notamment les facteurs qui apparaissent dans le temps au niveau de la paroi de la serre. Les plus importants de ces facteurs et qui influent sur l'effet thermique de la serre sont :

- 1) Condensation d'eau sur la face intérieure de la paroi.
- 2) La salissure de la paroi.
- 3) Vieillessement du matériau de la couverture.

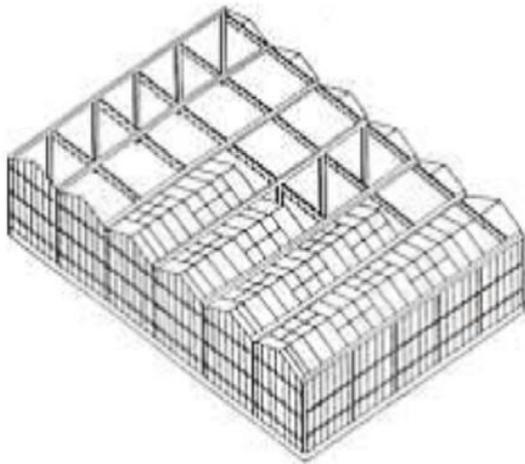
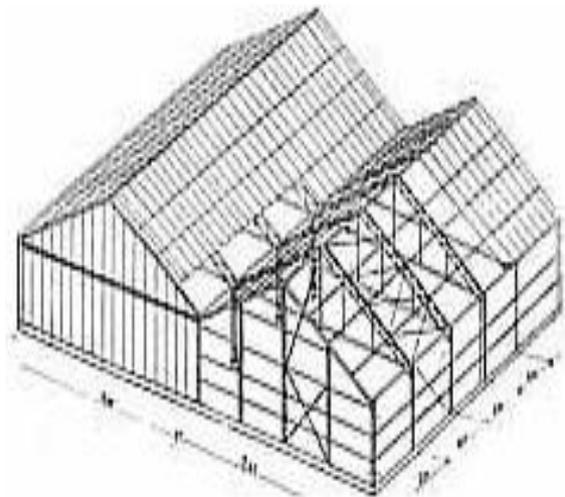
Tableau (I.1) : Ordres de grandeurs des caractéristiques principales de divers matériaux de qualité horticole utilisés en couverture de serres

	Unités (1)	Verres			Plastiques						
		verres à vitre 3 mm	vitrage double réfléchissant 2x4 mm	vitrage double isolant 2x4 mm	en plaques			en films		Polyéthylène basse densité 0.10 mm 0.15 mm	(Poly)éthylène-vinylacétate 0.10 mm 0.15 mm
					polyesters 1 mm	polymétrie de méthyle 3 mm	chlorure de polyvinyle 1 mm	chlorure de polyvinyle plastifié 0.15 mm 0.20 mm			
Propriétés optiques											
Indice de réfraction n_D		1.52	1.52	1.52	1.52 à 1.57	1.49	1.54	1.54		1.51	1.51
a) rayonnement visible 0.38-0.76 μm		0.87 à 0.90	0.60 à 0.20	0.70 à 0.40	0.7 à 0.8	0.85 à 0.93	0.77 à 0.80	0.80 à 0.87		0.70 à 0.85	0.70 à 0.85
b) rayonnement solaire 0.3-2.5 μm		0.85	0.50 à 0.10	0.50 à 0.30	0.6 à 0.7	0.73	0.75	0.82		0.80	0.80
c) rayonnement I.R 5-25 μm		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28		0.73	0.60 à 0.80
Propriété physiques et mécaniques											
masse volumique ρ	10^3 kg.k^{-3}	2.5	2.5	2.5	1.5 à 1.6	1.19	1.4	1.2 à 1.3		0.91 à 0.92	0.92 à 0.93
module d'élasticité (Young) E	kg.mm^{-2}	7000 à 7500	7000 à 7500	7000 à 7500	800 à 1000	300	300	2 à 10		18 à 22	14 à 17
résistance à la traction	kg.mm^{-2}	4 à 9	4 à 9	4 à 9	9 à 14	6 à 7	4.5 à 6.5	1.5 à 2.5		1 à 1.2	1.5 à 2
résistance à la flexion	kg.mm^{-2}	--	4 à 5	4 à 5	15 à 25	11	08 à 12	--		--	--
allongement à la rupture	%	--	--	--	très faible	très faible	50 à 200	150 à 300		350 à 500	650 à 900
résistance à la déchirure amorcé	g							500 à 1000 800 à 1300		500 à 1000 800 à 1300	500 à 1000 800 à 1300
résistance à l'impact	g							> 3200 > 3200		200 à 400 400 à 700	500 à 800 800 à 1200
Propriétés thermiques											
coefficient de dilatation linéique α	10^{-4}K^{-1}	8 à 9	8 à 9	8 à 9	40 à 50	73	60 à 80	60 à 80		200	100 à 200
coefficient de conductivité thermique λ	$\text{W.m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.7 à 0.9	0.7 à 0.9	0.7 à 0.9	0.17 à 0.23	0.16 à 0.17	0.15	0.14		0.29	0.35 à 0.41
coefficient de transmission thermique k	$\text{W.m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{°C}$	5.9	1.5 à 2.0	3.0	5.8	5.5	5.3	5.8		5.8	6.0
tenue au froid et à la chaleur		--	--	--	-20 à +100	-60 à +80	-20 à +70	-20 à +50		-40 à +50	-40 à 70
durabilité		--	--	--	5 à 10 ans si absorbeur UV et résine hors.	15 à 25 ans	5 à 10 ans si absorbeur UV	1 à 2 ans		0.5 à 1 ans sauf fabrication spéciale	1 à 1.5 ans sauf fabrication spéciale

(1) Les grandeurs sont donnée dans les unités du système, Facteur de conversion 1 W = 0.8598 kcal/h.

I.2.4) Les différents types de serre (Kamel Mesmoudi 2010)

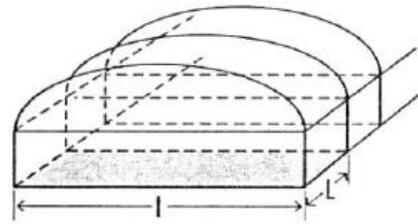
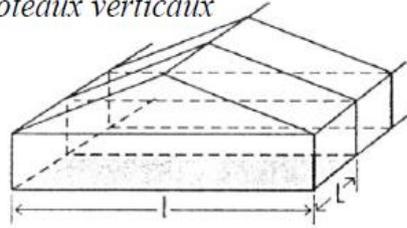
La classification des serres est très complexe est plus difficile, elle est souvent faite Selon les formes données par les cadres porteurs qui constituent l'assemblage, on distingue deux principaux types appartenant à deux grandes familles de serres : Les serres chapelles et les serres tunnels. Comme on peut les distinguer aussi suivant les formes de leurs toits : chapelles à versants plats et à poteaux verticaux, les chapelles dissymétriques, les chapelles sans poteaux verticaux, les chapelles à piédroits inclinés etc.

**Figure(I.3) :** Serre multi chapelles**Figure(I.4) :** Serre doubles chapelles**Figure(I.5) :** Serre petit tunnel**Figure(I.6) :** Serre de multiplication

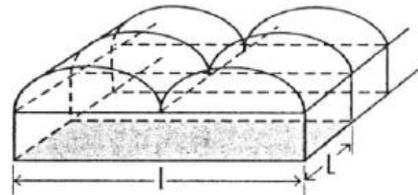
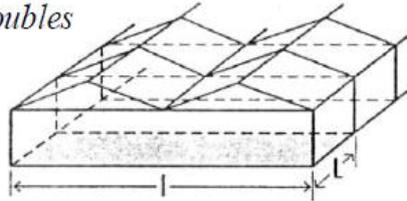
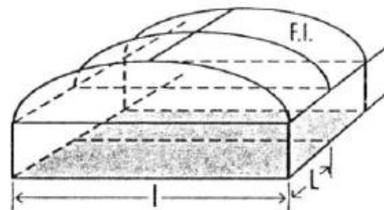
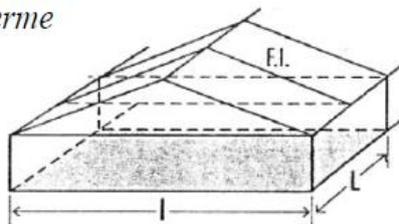
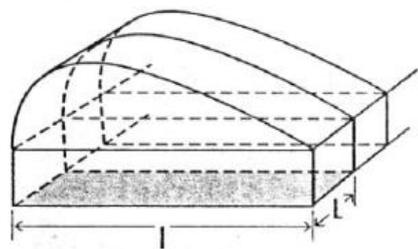
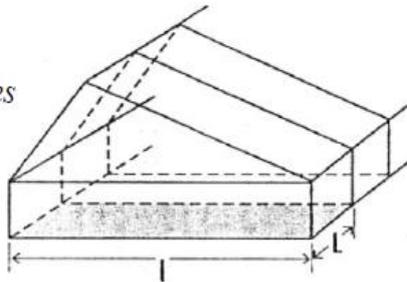
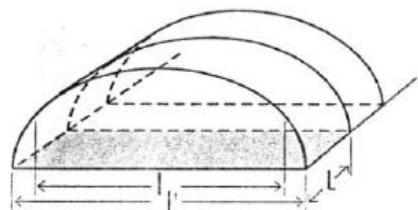
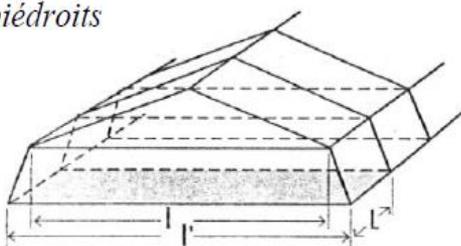
A- Chapelles à versants plats

B- Chapelles à toit courbe

Chapelles à poteaux verticaux



Chapelles doubles

Chapelles à ferme
IntermédiaireChapelles
DissymétriquesChapelles à pignons
Inclinés

Figure(I.7) : Schéma de la classification des serres agricoles(Kamel Mesmoudi 2010)

Il existe aussi d'autres types de serres plus petite appelée petit tunnel figure.(I.5), ce type s'est rapidement développé dans les pays méditerranéens en raison de leur faible coût de revient. Sa largeur à la base des arceaux est de 1,5 mètre et sa hauteur est de 0,45 mètre, sa longueur ne dépasse pas les 20 mètres. Le classement des serres se fait suivant le domaine d'utilisation :

- Les serres enterrées, qui sont surtout orientées vers la multiplication fig. (I.6) où les cultures en pots. Elles reposent sur des murettes, le niveau des tablettes est presque au niveau du sol. Par contre les couloirs sont creusés dans les terrains puis maçonnés.

- Les serres maraîchères sont souvent dénommées serres de type Hollandais, dénomination aujourd'hui inexacte. La largeur est de 3 mètres. On en rencontre dans l'ancien établissement d'horticulture florale, et utilisé surtout en maraîchage.

- La serre de multiplication, Elle est étroite, bien isolée de façon à pouvoir maintenir des températures élevées. La hauteur est basse et les largeurs de chapelles sont de l'ordre de 3 mètres.

- La serre horticole et la serre florale fig. (I.9). sont aérées. Elles peuvent être simples ou multi-chapelles, les largeurs de chapelle varient de 6 à 20 m. Pour la serre florale utilisée pour la production des fleurs coupées, elle est souvent très large. Les serres horticoles utilisées pour les plantes en pots, leurs largeur est de 15 à 20 m.



Figure(I.8) : Serre Horticole



Figure(I.9) : Serre Florale

I.2.5) Caractéristiques d'une serre

A) Les paramètres climatiques dans une serre

La température, l'humidité, la teneur en CO₂ et la lumière (durée d'ensoleillement) restent jusqu'à maintenant parmi les paramètres les plus influents dans la production des plantes. Pour améliorer leurs rentabilités, il est indispensable de faire optimiser le climat environnant aux cultures. Il est donc important de contrôler les paramètres climatiques et veiller aux exigences de la culture.

a) Lumière

La croissance et la vitesse de développement des plantes dépendent grandement des rayonnements solaires que la culture reçoit par jour. La durée d'ensoleillement est une référence capitale, bien que certaines cultures réagissent aux journées courtes, d'autres aux journées longues (périodicité des cultures). C'est pourquoi il est important de connaître la durée de jour tout au long de l'année. On peut prolonger la journée en utilisant la lumière artificielle ou la raccourcir en utilisant des stores (film en plastique noir). Ceci est surtout pratiqué dans les pays tropicaux pour permettre aux cultures de passer au stade de développement final.

Nous devons connaître la durée du jour pour choisir le type de culture à planter. La quantité totale d'ensoleillement détermine le taux de croissance et le niveau de développement des plantes. La variation de la durée d'ensoleillement est fortement liée aux saisons. Par ailleurs, la distribution de la pluviométrie annuelle et l'aspect nuageux sont également des facteurs déterminants. La topographie du terrain et surtout la présence de montagnes ont un effet sur le taux de condensation des nuages et des conséquences d'ombrage.

b) Température

La croissance des plantes dépend en grande partie de la température. Pour chaque type de culture, il y a un intervalle de températures optimales nécessaire qu'on appelle plage de températures de consigne pour la croissance et le développement des plantes. Les températures de consigne de certaines cultures sont données dans le Tableau (I.2) :

Tableau(I.2) : Intervalles des températures optimales pour la croissance de certains légumes (N. BIBI-TRIKI)

Culture	Température	Culture	Température
Tomates	18-23°C	Melon miel	13-18°C
Laitue	10-18°C	Poivron	18-23°C
Radis noir	20-26°C	Chou	15-23°C
Haricots verts	18-25°C	Aubergine	22-26°C
Paksoi	20-24°C	Concombre	22-26°C

Lorsque les températures sont juste un peu plus élevées ou un peu plus bas que les valeurs optimales indiquées ci-dessus, la croissance ne sera pas sérieusement affectée, mais si elles perdurent, le risque d'un retard de développement apparaît. Ce cycle correspond en somme à deux états successifs, qui sont l'état végétatif et l'état reproducteur. La croissance est quantitativement mesurable. Elle correspond à une augmentation irréversible de poids et

de dimensions, sauf dans le cas où la plante se trouve à un état inférieur au point de compensation lumineuse ou soumise à des températures critiques prolongées.

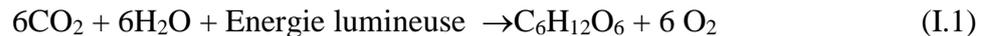
Le facteur de refroidissement dû au vent a également un effet sur la croissance de la plante. Des conditions de faible humidité atmosphérique accompagnée de beaucoup de vent provoquent des dommages plus rapidement. La température peut monter ou baisser brusquement au cours du temps. La tolérance des températures compatibles avec une vie active est assez étroite. L'effet de la température sur la croissance est le résultat de son action sur la photosynthèse, sur les réactions métaboliques et aussi sur l'alimentation hydrique et minérale. Toute personne qui a vécu cela aura la sagesse de bien équiper la serre de manière adéquate pour faire face à ces aléas.

c) Humidité

Le taux d'humidité relative HR est le rapport, en pourcents, de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale (saturante). Elle influe sur la croissance et la santé des cultures de différentes façons. Un taux d'humidité relative élevé favorise les maladies fongiques, Cet état de fait est dû aux fluctuations de température et à l'évapotranspiration qui se produit principalement au cours des premières heures de la journée. La condensation hydrique couvre facilement les plantes, créant ainsi les conditions idéales pour que les spores fongiques germinent rapidement. Il peut également affaiblir la culture et la rendre plus susceptible aux changements des paramètres climatiques. Cependant, dans une serre il y a beaucoup plus de méthodes qui permettent de contrôler le taux d'humidité que celui des cultures en plein champ. Pour en citer une, les plantes ne se mouillent pas lorsqu'il pleut. La ventilation fait entrer de l'air frais et moins humide et l'élévation de la température intérieure fera baisser le taux d'humidité relative. De l'autre côté, une humidité relative faible peut être défavorable à la croissance et favorise une transpiration excessive des cultures. Dans ce cas, Il est possible de prendre des mesures nécessaires, telles que : La brumisation, l'arrosage, l'utilisation de bâches d'ombrage, la ventilation et le refroidissement intérieur. Une faible HR présente un avantage dans les climats aux températures élevées car elle permet d'appuyer le refroidissement de la serre. Ce genre de situations exige une prise de décision favorable à la croissance de la culture. Les données moyennes du taux d'humidité relative ne représentent qu'une indication globale de l'humidité. En général, l'HR a des valeurs élevées tôt le matin et faible au milieu de la journée. Il s'agit là des moments critiques pour le contrôle et la régulation du climat à l'intérieur de la serre. Un suivi permanent des conditions climatiques intérieures est essentiel pour contrer ces aléas et réussir la production.

d) Teneur en gaz carbonique

Le CO₂ est essentiel aux plantes vertes pour la photosynthèse. Il est fixé par les feuilles vertes (chlorophylliennes) au niveau d'une structure cellulaire spécialisée appelée les stomates à pénétrer à travers des orifices nommés ostiole. Les stomates permettent l'absorption de CO₂ à différentes concentrations selon les besoins spécifiques de la plante. La photosynthèse représente l'inversion de la combustion du glucose. Cette réaction est endothermique et nécessite de l'énergie lumineuse :



La photosynthèse est un phénomène naturel qui permet la production de matière organique grâce à l'énergie lumineuse. Remarquons dans l'équation précédente que le dioxyde de Carbone est obtenu à partir de l'air puis converti en présence de l'eau et grâce à l'énergie lumineuse en glucose et en oxygène.

B) Orientation de la serre

L'orientation d'une serre se fait en tenant compte de l'éclairement solaire naturel, du type de serre, de la direction des vents dominants, de la configuration du sol et des particularités du terrain, il est difficile d'éviter l'existence d'une hétérogénéité de lumière à l'intérieur de la serre. Le sud est beaucoup plus éclairé et cela d'autant plus que le matériau de couverture est plus diffusant, la répartition est également hétérogène dans le temps avec une accentuation du maximum à midi.

Une orientation Nord-Sud va capter plus de lumière de fin de mars à septembre, avec une répartition plus homogène, cette orientation (Nord-Sud) à l'avantage de réduire les effets néfastes des vents tant sur la structure que sur les déperditions énergétiques.

I.3) Besoins des plantes

Les plantes sont sensibles à la lumière, au gaz carbonique, à l'eau, à la température, à l'humidité relative ainsi qu'aux mouvements de l'air qui interviennent lors de l'aération et de l'apport de certains éléments (approvisionnement en produits fertilisants, enrichissement en gaz carbonique, fourniture d'eau, brumisation, etc.).

Ces différents facteurs agissent sur la plante par l'intermédiaire :

I.3.1) La photosynthèse

Grâce à l'assimilation chlorophyllienne, la plante absorbe du gaz carbonique, rejette de l'oxygène. Cette assimilation n'est possible qu'en présence de la lumière. Dans certaines limites, elle devient autant plus active que la lumière est intense.

I.3.2) La respiration

La plante absorbe de l'oxygène et rejette du gaz carbonique. La respiration ne nécessite pas de lumière et se poursuit aussi bien la nuit que de jour. Elle brûle les réserves de la plante, alors que la photosynthèse les élabore.

I.3.3) La transpiration

La plante rejette de la vapeur d'eau.

Les facteurs : température, lumière, humidité et teneur en gaz carbonique agissent simultanément et d'une façon dépendante.

La température est le facteur privilégié d'action sur la croissance et le développement des plantes.

Les exigences thermiques idéales des différentes cultures sont assez mal connues.

Elles ont fait l'objet de très peu de travaux étant donné leur complexité (dépendance vis-à-vis des autres facteurs, étalement dans le temps...).

Malgré ces contraintes l'INRA propose des plages de températures à respecter en fonction du stade de développement de la plante (tableau I.3)

Le tableau (I.3) que nous propose l'INRA , classe les plantes maraichères en quatre catégories, suivant leurs exigences thermiques :

- Les plantes peu exigeantes : laitues et céleri.
- Les plantes moyennement exigeantes : la tomate.
- les plantes exigeantes : melon, piment, aubergine, haricots.
- Les plantes très exigeantes : le concombre.

Tableau (I.3) : Besoins de l'espèce légumière cultivée sous abris en fonction du stade de développement (INRA)

Espèce légumière cultivée	Durée entre la semé et le début de récolte (Jours)	Températures de germination (°C)		Températures pour la croissance (°C)		Températures pour la floraison (°C)		Humidité relative (%)	Températures critiques (°C)	
		Air	Sol	Air	Sol	Air	Sol		Air	Sol
Laitue	110 à 120	10 à 12	12 à 15	06 à 08 (N) 10 à 15 (J)	08 à 10	04 à 06 (N) 08 à 10 (J)	08 à 10	60 à 70	-2	3
Tomate	110 à 120	18 à 20	22 à 25	12 à 15 (N) 18 à 22 (J)	15 à 18	15 à 18 (N) 22 à 28 (J)	16 à 20	60 à 65	+4	8
Concombre	50 à 60	25 à 30	26 à 30	18 à 20 (N) 25 à 30 (J)	20 à 22	16 à 18 (N) 23 à 30 (J)	20 à 22	75 à 85	+6	12
Melon	115 à 125	22 à 25	25 à 27	13 à 16 (N) 25 à 35 (J)	18 à 20	16 à 18 (N) 25 à 30 (J)	18 à 20	50 à 60	+5	11
Piment	110 à 120	22 à 25	24 à 30	14 à 16 (N) 23 à 27 (J)	18 à 20	16 à 18 (N) 23 à 27 (J)	18 à 20	60 à 70	+5	10
Aubergine	110 à 120	22 à 25	24 à 30	16 à 18 (N) 23 à 27 (J)	18 à 20	16 à 18 (N) 23 à 27 (J)	18 à 20	60 à 70	+5	10
Haricot	55 à 65	18 à 20	20 à 22	16 à 18 (N) 20 à 25 (J)	18 à 20	16 à 18 (N) 20 à 25 (J)	18 à 20	60 à 70	+4	8
Céleri	110 à 120	14 à 16	14 à 16	08 à 10 (N) 12 à 16 (J)	10 à 12			60 à 70	-1	4

I.4) Effet de serre

La couverture de la serre est transparente. Elle laisse bien passer la lumière, elle emprisonne la chaleur qui se forme à l'intérieur (effet de serre), sous l'action des rayonnements solaires et s'oppose aux déperditions. La couverture transparente de la serre joue le même rôle que l'atmosphère de la planète. L'effet de serre est donc le phénomène de réchauffement de la serre dû à la perméabilité de la couverture à certaines radiations solaires incidentes. La transmission de la lumière est fonction du type de la couverture utilisée. Elle est de 70% pour le plastique anti UV et de 65% pour le plastique infrarouge.

Cette transmission diminue avec la présence des salissures et des dépôts de poussières. Par ailleurs, l'effet de serre génère durant la période estivale un accroissement de la température et une diminution considérable de l'humidité qui influe de manière négative sur l'éclairement et atteint des valeurs basses ainsi que sur le développement des plantes. Le recours à des techniques de contrôle des paramètres climatiques (température, humidité et éclairement) sous serre s'avère nécessaire, il permet de maîtriser les influences indésirables liées à l'effet de serre.

I.5) Energies d'appoint aux serres

La serre a besoin d'énergie pour son fonctionnement. Elle est écologique, et dans un environnement bien entendu naturel. Il ne peut s'agir que de remplacer progressivement dans la mesure du possible les énergies fossiles épuisables, et d'origines de beaucoup de pollution par des énergies renouvelables, propre et inépuisables, sans toutefois compromettre le développement économique global dans un cadre écologique viable et durable. Ainsi ces ressources énergétiques sont appelées à devenir les principales sources dans notre pays et ailleurs. Le développement rapide des utilisations de l'énergie solaire et les autres dérivées de cette énergie tel que les éoliennes la biomasse la géothermie etc. montre que la nouvelle ère des énergies renouvelable est en bonne voie.

I.6) Mouvements de l'air

L'une des différences majeures entre les conditions climatiques à l'intérieur de la serre et celles qui règnent à l'extérieur concerne les vitesses du vent qui entrent en jeu. La vitesse moyenne du vent est de l'ordre de 3ms^{-1} à 4ms^{-1} à l'extérieur, alors qu'elle est nettement plus faible à l'intérieure. Le rôle de la serre est essentiel, il empêche les perturbations d'air à l'intérieur et favorise la croissance des plantes, sensibles aux vitesses de l'air supérieures à 0.5ms^{-1} . Néanmoins, le mouvement d'air est nécessaire car il facilite les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et du dioxyde de carbone entre les plantes et l'air environnant. Même dans le cas d'une enceinte fermée, l'air intérieur n'est pas tout à fait au repos du fait qu'il existe des gradients thermiques (différence de températures). Ces gradients créent des mouvements d'air convectifs. Par ailleurs, la serre n'étant pas complètement étanche, les mouvements d'air à l'intérieur peuvent être induits par la présence des vents extérieurs. Comme ils peuvent être dus aux effets du chauffage ou des ventilateurs présents dans la serre.

Nous distinguons donc deux mécanismes prépondérants qui mettent en mouvement l'air dans la serre:

- Les forces de flottabilité qui correspondent à la poussée d'Archimède. Elles sont fonction de la densité de l'air. Elles même dépendent du gradient de température.
- La force motrice générée par le vent extérieur ou par les ventilateurs. Elle met en action des masses d'air dans la serre et crée des zones de surpression ou de dépression.

I.7) Aération

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. Durant le jour la plante transpire et

humidifie l'air environnant qui pourra se transformer dans le temps en excès d'humidité, proche de la saturation, propice aux maladies nuisible à la croissance et au développement des végétaux. L'importance de l'aération d'une serre peut être exprimée par le débit d'air échangé (volume d'air entrant ou sortant pendant l'unité de temps). L'aération peut se faire pour refroidir les serres lorsque la température intérieure dépasse Les limites supérieures admissibles pour les cultures. En général, l'opération s'effectue par l'ouverture d'une des deux portes de la serre au sens opposé du vent et par l'écartement des bâches plastiques tous les quatre mètres de façon intercalée des deux cotés de la serre. L'aération se fait pour les modèles les plus simples en soulevant le film sur les côtés figure.(I.12). Pour les autres modèles on utilise des ouvrants situés au milieu des montants et proche de plus en plus du faîtage, créant alors des parties à toit ouvrant, ce qui permet une largeur d'aération importante, mais l'inconvénient climatique est le confinement de l'air et la condensation de l'humidité de l'air dans cette partie de la serre.



Figure(I.10) : Aération par un seul versant

Figure(I.11) : Aération par double versant



Aération latérale par Enroulement mécanique Central



Aération latérale par Enroulement avec tube de maintien



Aération latérale par enroulement brise vent et mécanisme d'extrémité



Ouverture latérale

Aération latérale par gravité

Ouverture latérale 1.30 m

Figure(I.12) : Les différents modes d'aération latérale des serres (Kamel Mesmoudi 2010)

Ces images montrent les différentes combinaisons utilisées dans l'aération des serres par un seul versant et deux versants figures (I.10) et (I.11) ; l'aération latérale figure (I.12). Les équipements automatisés d'aération et de refroidissement sont nombreux, nous citons les ventilateurs, l'écran thermique, le filet d'insectes, les brumisateurs etc.

I.8) Échanges thermiques (Kamel Mesmoudi 2010)

Les conditions climatiques au voisinage du sol résultent des échanges de chaleurs et de masse entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Ainsi nous considérerons, dans cette étude que l'agro- système serre peut être décrit à partir des transferts d'énergie et de masse. Ces transferts peuvent s'effectuer sous trois formes différentes par rayonnement, par convection et par conduction.

I.8.1) Echanges radiatifs

Le rayonnement solaire constitue la source principale d'énergie naturelle, provenant du soleil, chauffant ainsi le système terrestre. La partie qui nous parvient se situe dans une bande spectrale grossièrement comprise entre 0.3 et 2.5 μm de longueur d'onde

A) Rayonnements de courtes longueurs d'onde

La propriété de transparence de la couverture des serres vis-à-vis de certains rayonnements, est de permettre la transmission d'une grande partie du rayonnement solaire et plus précisément celui qui est compris entre 0.4 et 0.7 (μm). Il s'agit là du rayonnement visible, qui contribue au processus de la photosynthèse de la plante. Sur un plan quantitatif, la fraction du rayonnement solaire visible transmise dans la serre est estimée à 'environ 60%, le reste est absorbé ou réfléchi par les parois et les différentes structures qui lui sont attachées.

La grande partie du rayonnement pénétrant est interceptée ou absorbée par la culture surtout lorsque elle est bien développée. La partie qui contribue à la photosynthèse représente 1 à 2 % du rayonnement global incident au sommet de la culture, mais la part du rayonnement réfléchi vers l'extérieur n'est pas négligeable, comme c'est le cas des cultures hors sol

B) Rayonnements de grandes longueurs d'onde (rayonnements infrarouge)

Les échanges par rayonnements infrarouges se produisent essentiellement entre le sol, les plantes, les parois, et l'extérieur. La nature de la couverture (Nisen, 1969). Joue un rôle très important dans ce genre d'échanges car les propriétés de transmission dans l'infrarouge thermique varient suivant la nature du matériau. Les matériaux utilisés pour la couverture doivent être le plus transparent possible aux rayonnements visible et opaque aux rayonnements infrarouges ce qui donnent naissance à ce que on appelle (l'effet de serre) comme c'est le cas des verres spéciaux opaque aux infrarouges. Les échanges radiatifs entre les différents constituants de la serre ont été largement étudiés par de nombreux auteurs. Les simulations de ces rayonnements, et travaux expérimentaux ont fait l'objet de plusieurs travaux et longues recherches. Par conséquent, ces travaux ont conduit à l'élaboration des modèles très détaillés et viable qui prennent en compte l'ensemble des échanges radiatifs en fonction des facteurs et paramètres physique et biophysique.

I.8.2) Les échanges convectifs

La convection est le mécanisme le plus important dans le transfert de chaleur sous serres. Il est évident que les transferts convectifs dans ce système s'effectuent entre leurs composantes solides (sol, parois) et l'air.

Ces échanges convectifs se produisent entre l'air et les parois, entre l'air et la culture et entre l'air et le sol. On a l'habitude de distinguer trois types de convection: libre, forcée ou mixte et l'écoulement peut être laminaire ou turbulent. On détermine chaque régime d'écoulement en faisant intervenir les nombres sans dimensions tel que le nombre de Reynolds et le nombre de Grashof. (Benlehcene Djaouida, 2012)

A) Convection libre

La convection est dite libre lorsque le mouvement du fluide est dû à l'action simultanée des différences de température qui existent dans le milieu et d'un champ de force massique. Par exemple, au cours de la journée, la surface du sol s'échauffe car son bilan radiatif est positif. La température de l'air croît et sa masse volumique décroît. Une particule d'air chaude reçoit ainsi de la part de l'air environnant plus froid, une poussée d'Archimède. Cette particule d'air s'élève, elle est remplacée par de l'air plus froid qui s'échauffe à son tour et le processus continue. Cet exemple ne fait intervenir que des forces de pesanteur et la convection est libre, elle est qualifiée de convection naturelle.

B) Convection forcée

La convection est dite forcée lorsque le mouvement du fluide est provoqué par un champ de force extérieur. Le coefficient de convection forcée entre une paroi et l'air dépend de la vitesse du vent qui est lui-même la résultante du gradient local de la pression atmosphérique (Benlehcene Djaouida, 2012).

C) Convection mixte

Ce cas, est souvent rencontré quand la vitesse du vent est faible. Les mouvements de l'air sont alors produits à la fois par les facteurs qui entraînent le vent, et par les gradients verticaux de température. Les transferts de chaleur et de masse sont alors dus en partie à la convection naturelle et en partie à la convection forcée mécanique.

I.8.3) Échanges par conduction

Ces transferts thermiques s'effectuent à travers le sol (masse thermique) et sa surface, aussi à travers les parois (vitres, film en plastique, PVC etc.). La modélisation et l'établissement des modèles mathématiques, traduisant les phénomènes considérés, et aboutissent alors à la résolution d'un système d'équations, par des méthodes numériques.

Les échanges de chaleur par conduction concernent essentiellement les transferts thermiques dans le sol et à travers les parois. Compte tenu de la faible épaisseur des parois, et sa faible inertie, on considère que les échanges sont relativement stationnaires et on les intègre dans un coefficient global de transfert thermique. Le sol n'est pas homogène verticalement. Il peut être constitué par différentes couches qui ont des propriétés thermiques spécifiques (composition, texture, humidité etc.), en plus des propriétés du sol qui peuvent varier en fonction du temps. C'est pourquoi on utilise des modèles numériques complexes dans lesquels le sol peut être représenté comme l'empilement de couches hétérogènes et dont les équations de base, régissant le phénomène de conduction, peuvent être appliquées. (Benlehcene Djaouida, 2012). Il faut noter que le choix judicieux du matériau de la paroi de la serre ne suffit pas à lui seul car la paroi subit au fur du temps des altérations dues aux effets de l'atmosphère environnante

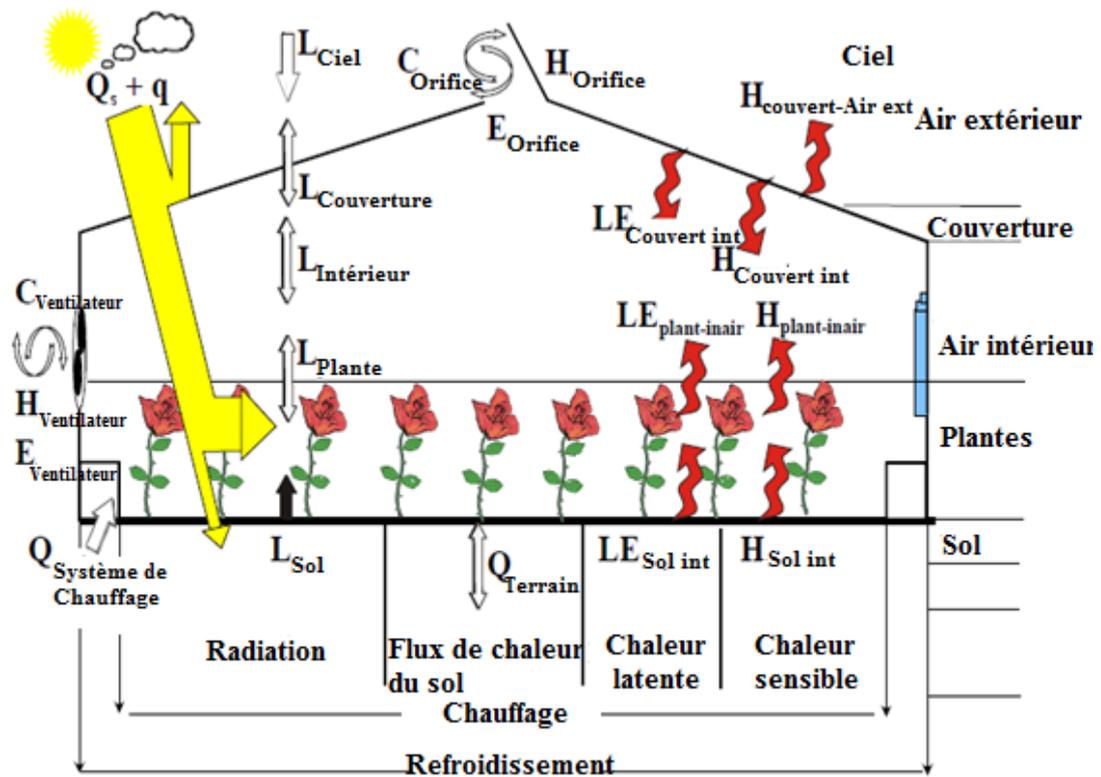


Figure (I.13) : Une représentation schématique des processus physiques d'échange d'énergie dans les systèmes de production de serre.

I.9) Composantes climatiques essentielles de la serre

L'acquisition de données dans une serre exige l'installation des capteurs météorologiques. Il s'agit des composants électroniques qui transforment des grandeurs physiques en grandeurs électriques. Ils sont branchés en amont de la chaîne d'acquisition.

I.9.1) 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 pris dont la plage d'enregistrement s'étend largement avec une bonne précision.

I.9.2) 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. Il existe plusieurs capteurs à variation d'impédance :

A) Hygromètres résistifs

Sur un support de faible dimension, on dépose une quantité de substance hygroscopique suivant un motif constituant une résistance. Celle-ci dépendra donc à la fois de la teneur en eau et de la température. Le domaine de mesure pour ce type de capteur s'étend de 5% à 95% d'humidité pour des températures comprises entre -10°C et 50°C. Le temps de réponse est théoriquement de l'ordre de 10 s pour une précision de 5% environ.

B) Hygromètres capacitif

Le principe de ce type de capteur est basé sur la variation de la capacité d'un condensateur par l'intermédiaire de son constant diélectrique. Le diélectrique est d'une épaisseur de quelques microns qui absorbe les molécules d'eau de l'air ambiant jusqu'à l'équilibre. La difficulté liée à ce dispositif réside dans le fait qu'il requiert une faible épaisseur de diélectrique pour obtenir une valeur importante du condensateur.

C) Équipements de régulation

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. Il y a deux types de chauffages :

- **Émission par air chaud**

Produit à partir d'un appareil autonome qui génère l'air chaud, ou d'un aérotherme utilisant l'eau chaude produite à partir d'une chaudière.

- **Émission par eau chaude**

Envoyée dans des tubes en PVC ou en multicouches répartis dans la serre à basse ou à haute température selon les exigences culturaux.

Les différents systèmes peuvent être utilisés de façon à se compléter. Le choix de l'équipement de chauffage est influencé par le type et l'âge de la structure de la serre, par la température de consigne des cultures et le créneau de production. Les besoins en chauffage sous serre sont relativement élevés particulièrement en saison d'hiver.

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 CO₂ 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.

- **Ventilation naturelle**

Elle est assurée par des aérateurs faîtières et latéraux et elle est, en général, suffisante dans les serres en verre uni-chapelle à condition qu'elles soient munies de toiles d'ombrage ou de pulvérisateurs en brouillard et que la dimension des ouvertures soit aussi suffisante. La circulation et le brassage de l'air s'opèrent, à l'intérieur de la serre, sous l'effet de forces naturelles exercées par le vent de l'extérieur et les différences de température de l'air à l'intérieur de la serre. Quand les aérateurs sont ouverts, ces forces naturelles entraînent également des échanges d'air avec l'extérieur. Il faut que l'air qui s'échappe soit remplacé par de l'air frais de l'extérieur et qu'en outre la surface des aérateurs soit suffisante. La surface des aérateurs latéraux devrait être au moins égale à la moitié de la surface totale des aérateurs faîtières. L'ouverture et la fermeture des aérateurs faîtières et latéraux dépendent de la température sous serre, mais le dispositif de commande des aérateurs peut également comporter des sondes qui détectent ou mesurent la direction du vent, la vitesse du vent, la pluie et la teneur en CO₂. Les aérateurs, situés à l'abri du vent, s'ouvrent progressivement.

On peut se servir de sondes mesurant la vitesse du vent pour commander la fermeture des aérateurs. La ventilation naturelle est efficace si les aérateurs sont de surface suffisante et s'ouvrent soit automatiquement soit manuellement. Elle consomme beaucoup moins d'énergie que la ventilation forcée. Si les aérateurs faîtières ne suffisent pas, la ventilation mécanique doit intervenir

- **Ventilation forcée**

Elle permet d'atteindre des débits élevés de circulation d'air dans une serre de grande dimension ou dans une serre où la ventilation naturelle est insuffisante. Elle présente l'avantage de permettre un réglage précis de la vitesse et de la direction de l'air, de stimuler l'assimilation de CO₂ et d'éviter la condensation à la surface des feuilles en forçant l'air à circuler au sein du couvert végétal. La ventilation mécanique est simple et s'applique à toutes les serres de construction classique ou complexe. Elle exige une bonne qualité d'étanchéité de l'enveloppe de la serre. Les prises d'air et les ventilateurs d'extraction doivent être conçus de telles sortes que la circulation de l'air soit homogène. L'espacement des ventilateurs et l'emplacement des prises d'air dépendent du type de serre, des catégories des plantes à cultiver, de la direction du courant d'air par rapport à l'axe longitudinal de la serre et aux rangs de culture. Pour la ventilation d'été, la serre doit être dotée de prises d'air sur toute sa

longueur ou sa largeur et, si possible, du côté du vent dominant. Leur ouverture devrait être réglée automatiquement de telle façon que la vitesse de l'air à l'entrée soit peu élevée, de l'ordre de 0,75 à 2,50 m/s. Cela minimise la turbulence et le brassage de l'air entrant avec l'air intérieur. L'air entre dans la serre suivant un plan horizontal à la hauteur des plantes.

3) Humidification

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

- **Brumisateur**

Cet appareil 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.

- **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.

- **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.

- **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.

4) 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.

- **Ventilation et chauffage**

Cette méthode de déshumidification est la plus utilisée. En faisant rentrer de l'air extérieur frais et en le chauffant, on augmente sa capacité à contenir de la vapeur d'eau et on réduit par conséquent l'humidité dans la serre.

Cette méthode de déshumidification est efficace mais son utilisation est limitée par les conditions climatiques extérieures. En hiver, lorsque la température est très basse, le gel ou l'accumulation de neige empêche parfois l'ouverture des ouvrants. De plus, l'arrivée massive d'air froid dans la serre peut créer un stress considérable à la culture. Les coûts énergétiques associés à la déshumidification par le chauffage et la ventilation sont importants.

- **Condensation**

La condensation de la vapeur d'eau sur la face interne de la paroi de la serre permet également de réduire le contenu en vapeur d'eau. Les serres à double parois séparé par injection de l'air en tant qu'isolant entre les deux films en polyéthylène sont plus chaudes que les serres conventionnelles et les serres chapelle habillées en verre. En ce qui concerne les serres tunnel en polyéthylène, il est fortement recommandé d'utiliser un film en plastique anti-goutte, afin d'éviter les chutes de gouttes d'eau due à la condensation sur les plantes. En hiver, la température est généralement basse et l'enveloppe de la serre se refroidit intensément et privilège la condensation en film d'eau sur sa face interne.

Il faut noter enfin de ce chapitre que tous ces modèles et méthodes d'interventions pour équilibrer le microclimat de la serre en fonction des besoins vitaux de la plante cultivée sous abri ne suffisent pas s'il n'ya pas un entretien préventif et un suivi permanent de l'état de la serre dans le temps. Il ne faut pas négliger l'importance de la couverture, qui au faite est une barrière artificielle stimulant l'effet de serre, source de transparence aux rayonnements dans le visible et d'opacité aux rayonnements infrarouges. Nous connaissons tous les problèmes de salissures qui couvrent la paroi. Cette saleté qui se dépose sur la paroi provient des poussières atmosphériques ainsi des résidus industriels à base de suie et de mazout

provenant notamment des brûleurs utilisés dans l'agriculture. Ce dépôt provoque une perte assez importante de transmission lumineuse et bien entendu une baisse de rendement de la culture. Cette perte moyenne annuelle de lumière dans les conditions normales d'utilisation est d'avantage encore dans le cas des matériaux à face non lisse. Il est recommandé pour les serres chauffées d'installer la chaudière ainsi que la cheminée dans un endroit isolé sous les vents dominants ou bien d'élever la hauteur de la cheminée. Ce problème de manque ou d'absence d'entretien entraîne aussi un vieillissement plus rapide qui se traduit par des altérations des propriétés optiques suite à la photo-dégradation et par un affaiblissement des propriétés mécaniques qui s'extériorisent sous forme de déchirures, de délaminage etc.

Parmi les problèmes optiques causés par ce vieillissement on retient :

- 1) Le jaunissement du matériau résultant du déplacement des bandes d'absorption, qui apparaissent dans l'ultraviolet
- 2) La microfissuration de la face exposée aux rayonnements solaires qui favorise le caractère diffusant et altère la transparence du matériau.

CHAPITRE II

Notions sur l'intelligence artificielle

Dans ce chapitre, nous présentons en générale les techniques de contrôle et de commande de la gestion climatique des serres agricoles par l'application de l'intelligence artificielle. Il s'agit particulièrement des réseaux de neurones artificiels, de la logique floue, des algorithmes génétiques, des techniques de contrôle, de l'informatique et de toutes les structures qui leurs sont attachées.

Ces techniques sont largement appliquées dans le monde de l'industrie moderne, dans la robotique l'automatisme et notamment dans l'industrie agroalimentaire. La serre agricole, auquel nous envisageons appliquer ces techniques, nous interpelle pour approcher le système en tenant compte des contraintes qu'on peut rencontrer dans un système biophysique, tel que la non linéarité, la fluctuation des variables d'état, le couplage entre les différentes variables, les aléas du système dans le temps, la variation des paramètres météorologiques, les perturbations climatiques non contrôlable etc. Tous ces handicaps nous poussent à envisager l'étude et l'élaboration d'un contrôleur intelligent et les modèles de contrôle de régulation et de commande de l'environnement climatique de l'ambiance interne des serres

Le nombre croissant de rencontres et de congrès de haut niveau tenus annuellement partout dans le monde démontre de l'intérêt que porte les chercheurs et scientifiques à l'application des techniques intelligentes dans diverses domaines ; économique, industriel, automatique, biophysique ,biologique etc. Cette nouvelle tendance, nous interpelle pour l'appliquer dans le domaine de la gestion climatique des serres agricoles, à des fins de production de qualité, de productivité, de rentabilité, d'autosuffisance alimentaire et pourquoi pas dans le cas d'excès de production agricole, a promouvoir l'exportation, puisque notre pays est avant tout, un pays à vocation agricole

II. Systèmes de la commande intelligente (SISO et MIMO) [182]

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 appeler signal de référence ou de consigne. Dans les applications typiques de contrôles, Le procédé comprend une mono- entrée, mono- sortie (SISO) ou multi-entrées multi-sorties (MIMO) (Skogestad & Postlethwaite, 2005). 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 riens (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).

Avec les exigences toujours croissantes sur les systèmes de contrôle pour s'adapter à d'autres capacités et fonctionnalités, ces systèmes sont devenus de plus en plus complexes. En

outre, la plupart de ces systèmes sont intrinsèquement non linéaires, Les variations temporelles ou dynamiques, sont très complexes et mal comprises comme c'est le cas dans la plupart des systèmes de contrôle des procédés industriels (Babushka & Mamdani, 2008).

Cependant, les progrès récents dans les domaines de l'informatique, des systèmes de communication et des technologies de contrôle intégrées, ont conduit les experts dans le domaine du contrôle de l'ingénierie, à développer plusieurs nouvelles stratégies de contrôle, d'architectures et d'algorithmes pour répondre aux nouvelles exigences qui s'imposent dans ces systèmes et faire face aux complexités qui en découlent.

Pour cette raison, les structures du système de contrôle avec une fonction multi-contrôleurs (Breemen & Vries, 2000) ont considérablement évoluées comme les architectures de contrôle les plus dominantes, où manifestement plusieurs contrôleurs sont utilisés pour contrôler un système entier.

Les systèmes avec plusieurs contrôleurs sont devenus standard dans la communauté de contrôle. Dans la littérature, le sujet des systèmes multi-contrôleurs a été développé sur une variété de domaines de recherche différents et principalement étudiés sous divers noms et termes, tels que le contrôle distribué (Tan, Yu, & Yu, 2008) , multiple-control (Breemen & Vries, 2000), le contrôle multi-agent (Jennings & Bussmann, 2003), les systèmes de contrôle coopératif, de contrôle collaboratif et d'apprentissage distribué (Choi, Oh, & Horowitz, 2009).

Ces architectures ont été utilisées avec succès dans différents domaines d'application, tels que les procédés industriels, systèmes d'alimentation (McArthur et al., 2007), télécommunications, robots (Kelly & Keating, 1998) et les automobiles, pour ne citer que quelques domaines d'application.

Grâce à une étude succincte de ces architectures, il apparaît clairement qu'elles ont plus d'avantages sur une seule structure de contrôle et qu'elles ont été proposées à deux fins principales. Premièrement, de gérer plus efficacement la complexité de ces systèmes (Narendra, 2005) , et, d'autre part, d'atteindre l'apprentissage par la collaboration entre les différentes parties d'un système (Choi et al., 2009).

Dans la surveillance de systèmes de contrôle de processus complexes, une architecture d'un système multi-agent a été introduite dans (Tan, Yu, & Yu, 2008b). Dans le contexte de l'apprentissage, différents travaux ont été rapportés (Ahny, Chenz, & Moorex, 2011, Jorge Ierache, 2010, Kelly et Keating, 1998, Lu, Zhang et Xie, 2011, Schöllig, Alonso Mora, Andrea, 2010). Les chercheurs de (Kelly & Keating, 1998) ont décrit un algorithme d'apprentissage pour les petits robots autonomes mobiles, où deux robots apprennent à éviter les obstacles et les connaissances acquises sont ensuite transmises de l'un à l'autre par

communication intelligente. Une étude analytique d'un environnement multi-agent a été réalisée (Schöllig et al., 2010), où les agents exécutent des tâches similaires et échangent des informations entre eux. Les résultats ont montré une amélioration de la performance et un taux d'apprentissage plus rapide des agents individuels.

Parallèlement aux architectures de contrôle susmentionnées, le contrôle intelligent est apparu comme l'un des domaines le plus dynamique dans l'ingénierie de commande au cours des dernières décennies.

Le contrôle intelligent utilise et développe des algorithmes et des conceptions basés sur l'émulation de comportements intelligents d'êtres biologiques, comme la façon dont il effectue une tâche ou comment il peut trouver une solution optimale à un problème, (Antsaklis, 1999; Narendra, 1991; Shin & Xu, 2009). Ces comportements peuvent inclure l'adaptation à de nouvelles situations, l'apprentissage de l'expérience, et la coopération dans l'exécution des tâches (Antsaklis, 1999).

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).

Ces outils ont été largement utilisés dans la conception de nombreux systèmes de contrôle intelligents. Une large gamme d'applications a été présentée dans (Eberhart & Shi, 2007; Engelbrecht, 2007; Liu & Wang, 2006; Ruano, 2005; Rutkowski, 2008; Shin & Xu, 2009). Comme c'est le cas dans notre travail, où il est question de traiter la modélisation d'un contrôleur intelligent par la logique floue en utilisant la méthode de Mamdani, destiné à la gestion climatique optimale de l'ambiance interne d'une serre agricole.

II.1) Aspects particuliers de l'informatique sur la culture en serre

Au cours des dernières décennies les progrès des technologies de l'information (TI) ont été appliqués à la culture en serre, répondant à la nécessité d'une production uniforme des plantes pendant toute l'année. La culture des plantes dans un environnement contrôlé, est un processus très compliqué avec de nombreux paramètres qui peuvent directement ou indirectement affecter la productivité. Pour que ces paramètres soient contrôlés, tous les phénomènes physiques de l'environnement de serre doivent être analysés pour calculer les

bilans d'énergie et de masse. Le contrôle de rétroaction ne repose que sur des mesures instantanées en temps réel, mais pour un contrôle optimal et une gestion dynamique des modèles physiques (Bot, G. P. A. 1991, Bakker, et al , 1995) et biologique (Jones, et al , 1991, Volk, et al 1995) sont encore en cours de recherche. Les systèmes physiques sont bien définis et élaborés depuis longtemps alors que les systèmes biologiques sont plus complexes et incertains. Les efforts dans la modélisation biophysique n'ont que récemment atteint un stade d'utilisation pratique (Marcelis, et al, 1997) et ont un long chemin à parcourir pour devenir un couplage matures de la biophysique et de la technologie.

Cependant, les exigences sociétales pour le respect de l'environnement et les exigences quantitatives et qualitatives des consommateurs, sous la concurrence des prix des marchés mondiaux, ajoute de nouvelles dimensions et contraintes dans la gestion optimale d'un système viable. La gestion intégrée de la production, fournit à la fois la raison et les moyens d'avancer dans ce domaine biophysique (modèles concernant les populations d'insectes, les maladies, la production, etc.) et les implémentations informatiques qui devront atteindre des niveaux supérieurs pour devenir fiables et s'intégrer en tant qu'intrants nécessaires au processus de la production. Les technologies de la culture (hydroponique, récolte, robotique, usines de plantes, etc.) deviennent matures et moins coûteuses, car elles acquièrent une large acceptation, ce qui stimule les besoins en connaissances en passant de l'ère de l'information, de la modélisation théorique classique à l'ère des connaissances et de l'intelligence artificielle. Des efforts ont été entrepris sur la base des technologies de communication modernes pour fournir le pont manquant reliant les bases de connaissances à l'émulation au sein des contrôleurs intelligents de commande (Sigrimis, et al, 2000).

II.2) Techniques du contrôle du climat de la serre

De nombreuses études ont été menées sur le contrôle du climat de la serre. Parmi ces études, Setiawan est le premier à appliquer la structure de contrôle PD-OF pour contrôler la température de la serre (Setiawan, 1998). Ce schéma est une modification de l'algorithme Pseudo-Dérivée Feedback (PDF) qui est développé par Phelan (Phelan, 1971). Le contrôleur proportionnel-intégral-plus (PIP) a également été utilisé pour contrôler la vitesse de ventilation dans les bâtiments agricoles afin de réguler sa température (Taylor et al., 2004).

Le contrôle de la température de l'air à lui seul ne peut que conduire vers une mauvaise gestion de la serre. Ceci est principalement dû au rôle important de l'humidité relative qui agit sur les processus biologiques (tels que la transpiration et la photosynthèse). C'est la raison, Pour laquelle, qu'on accorde dans la recherche, plus d'attention au couplage entre la température de l'air intérieur de la serre et l'humidité relative. Ces variables ont été contrôlées

simultanément en utilisant la structure de contrôle PID-OF (Albright et al., 2001), et plus tard, la structure de contrôle PI (Pasgianos et al., 2003). Bien que de bons résultats aient été obtenus en utilisant ces contrôleurs classiques, Leur solidité s'est dégradée sous l'effet des conditions de fonctionnement du procédé. Des schémas de commande intelligents sont proposés en tant qu'option alternatif pour contrôler de tels systèmes complexes, incertain et non linéaire (Gates et al., 1999, 2001).

Donc on peut dire que la base de contrôle de l'environnement de la serre consiste en des techniques de contrôle classiques comme le contrôleur PID et les techniques de l'intelligence artificielle tel que les réseaux de neurones et ou logique floue, qu'on compte appliquer au contrôle climatique et à la régulation de l'ambiance interne de la serre.

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 CO₂. La température extérieure et l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement solaire, et la concentration en CO₂ sont considérés comme des perturbations. Les sorties sont la température intérieure, l'humidité relative, la concentration en CO₂ et l'intensité lumineuse au niveau de la centrale.

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). Un contrôleur PID a la capacité de gérer les changements de consigne, pour compenser les perturbations de charge, et de faire face à une grande incertitude du modèle. Pour améliorer la gestion et le contrôle d'un processus de serre, une stratégie de contrôle PID adaptatif (Figure II.1) peut être appliquée pour calculer les signaux de commande optimum utilisée pour une fonction définie par le coût / performance. Des versions plus simples du régulateur PID ont également été utilisées dans le contrôle des conditions de serre.

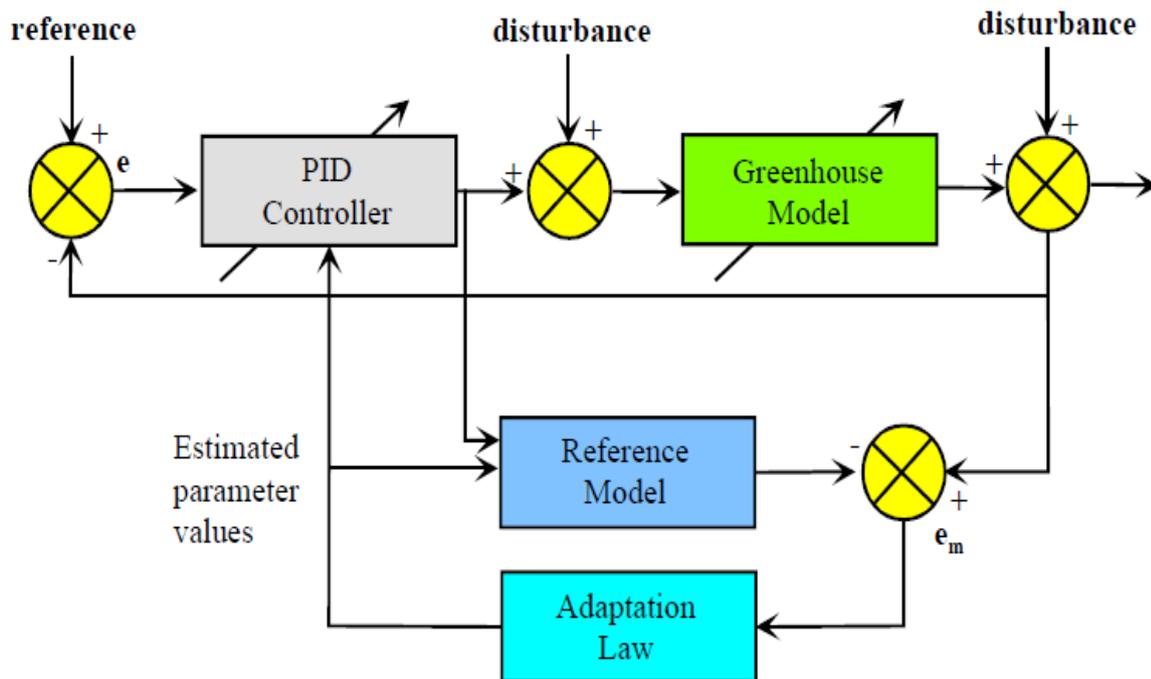


Figure (II.1) : Structure du contrôleur PID adaptatif (Chao et al, 1996)

La serre pendant de nombreuses années (début des implémentations de rétroaction) a connue des applications de commutateurs (thermostats, hygromètres, pressostats). Etant donné que la plupart des équipements de serre sont du type à commutateur binaire, l'application de telles méthodes de contrôle dynamique est encore plus compliquée. Pour que ce type d'équipement soit inclus dans le système de commande dynamique, on doit linéariser chacune des équations dynamiques d'une façon similaire à la modulation de la largeur d'impulsion (Chao et al, 1996). Une variante de régulateur PID, à l'algorithme de rétroaction pseudo-dérivée (PDF) (Phelan, 1977), a également été utilisée avec succès dans le contrôle de la température et l'humidité des serres (Albright et al, 2001, and Setiawan et al, 2000). Une autre méthodologie de contrôle, qui est née de la recherche sur le contrôle de l'environnement de serres, est le régulateur proportionnel-intégral-plus (PIP) (Chotai et al, 1991), qui a montré plusieurs avantages par rapport au contrôle PID ou PI classique, y compris la robustesse aux délais de transport en temps réel, la puissance et la flexibilité en raison de sa rétroaction aux variables d'état et une structure qui évite les problèmes de contrôle communs tels que l'enroulement intégral (Young et al, 1994 and Lees et al, 1996). Une amélioration du régulateur PID a fait objet d'un prédicateur, Smith [115], qui compense les temps morts des marges inférieures de stabilité et ses performances en boucle fermée. Il a été utilisé dans le

contrôle de l'environnement de serre avec des résultats positifs (Jones et al, 1991). Enfin, une approche qui conduit à une meilleure répartition de la température et minimise les pertes de chaleur, est basée sur la configuration d'une boucle de commande imbriquée et à concept de diviseur de charge (Sigrimis et al, 2002), qui divise les besoins d'entrée en actionneurs correspondants, ce qui permet d'obtenir une meilleure performance du système de commande.

II.2.2) Contrôleurs de rétroaction pseudo-dérivés

A) Structure du contrôleur

L'algorithme Pseudo-Dérivative Feedback (PDF) a été d'abord développé par Phelan (Phelan, 1971), qui est une modification de la commande intégrale avec un algorithme de rétroaction dérivée (I-DF). L'algorithme I-DF a un intégrateur dans le chemin vers l'avant dans lequel le contrôleur est habituellement situé (par exemple PI) et une rétroaction dérivée des variables contrôlées, qui sont représentées sur la Figure (II.2). Le système de commande est entièrement contrôlable si toutes les dérivées des variables contrôlées sont disponibles en retour. Le nombre de dérivés nécessaires est l'ordonnance de la fonction de transfert du système contrôlé. Mathématiquement, ce contrôleur fonctionne bien, mais dans l'application, les dérivées de la variable contrôlée induisent un bruit significatif, en particulier pour les dérivés du second ordre et d'ordres supérieurs.

Contrairement à l'I-DF, dans le PDF, au lieu d'alimenter la dérivée de la variable contrôlée, c'est la totalité de la rétroaction de dérivées de variables contrôlées qui est contournée vers la sortie de l'intégrateur. Cette approche réduit le nombre de dérivés, voir la Figure (II.3). Bien que, les coefficients des deux contrôleurs soient différents, mais ils ont les mêmes réponses.

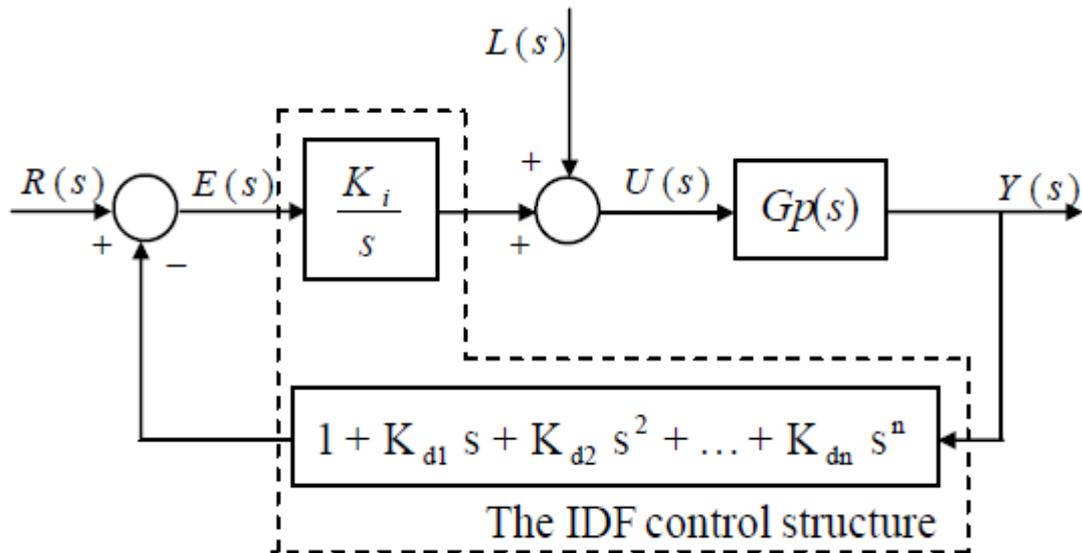


Figure (II.2) : Le système de contrôle I-DF (Setiawan, 1998)

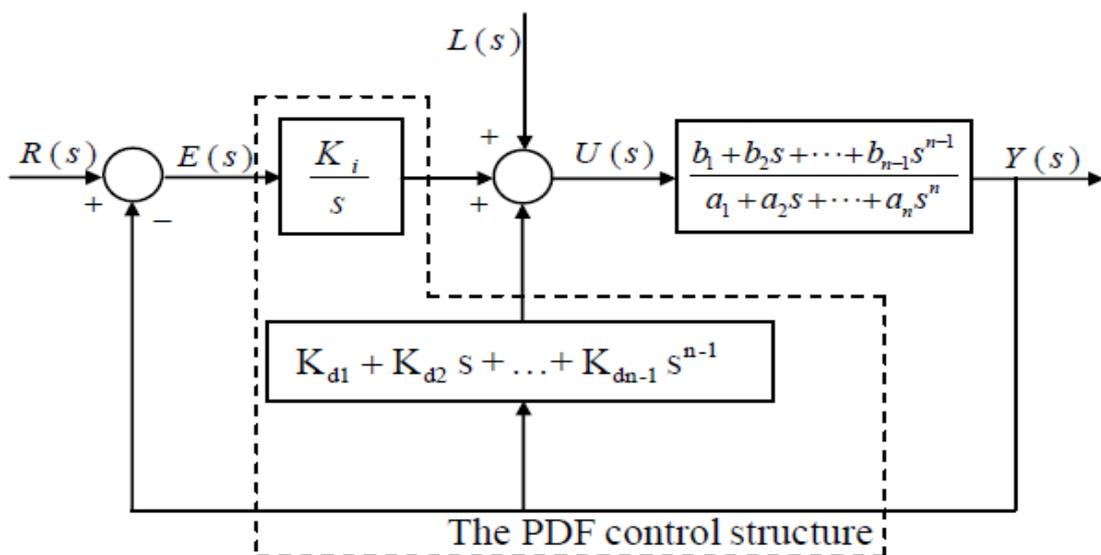


Figure (II.3) : Le système de contrôle PDF (Setiawan, 1998)

Nous concentrons notre attention sur le cas le plus simple de la structure générale de contrôle PDF, qui est représentée dans la Figure (II.4), Nous appelons ce schéma de rétroaction le PD-0F, Qui est appliquée d'abord au contrôle de la température sous abri par Setiawan (Setiawan, 1998). La performance du PD-0F (Ou en bref, PDF) et le contrôle PI ont prouvés à travers les résultats, que le contrôle PDF avait une capacité meilleure de manipulation de charges que le contrôle PI (Setiawan et al., 1998).

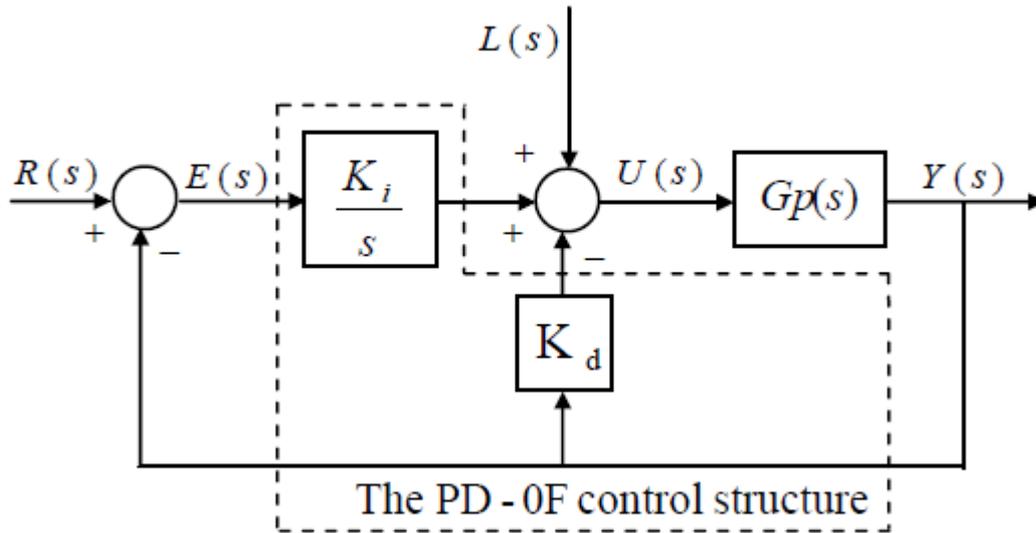


Figure (II.4) : Structure de contrôle PD-0F appliquée au modèle du processus (Albright et al., 2001)

Ensuite, nous allons analyser le comportement de ce schéma de rétroaction spécifique, Notamment dans le cas où le système contrôlé est un processus FOPDT ou IPDT avec des fonctions de transfert comme dans les équations (II.1) et (II.2) (Albright et al., 2001; Koutb et al. 2003) :

$$X_1(s) = \frac{K_T e^{-d_T s}}{\tau_T s + 1} \tilde{U}_T(s) = G_T(s) \tilde{U}_T(s) \tag{II.1}$$

$$X_2(s) = \frac{\check{K}_W e^{-d_W s}}{s} \tilde{U}_W(s) = G_W(s) \tilde{U}_W(s) \tag{II.2}$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée $G_{CL}(s)$ prend la forme:

$$G_{CL}(s) = \frac{K_i G_P(s)}{s + (K_d s + K_i) G_P(s)} \tag{II.3}$$

Où la fonction de transfert en boucle ouverte du procédé $G_P(s) = G_T(s)$ pour la boucle de température et $G_W(s)$ pour la boucle d'humidité.

B) Contrôle intelligent en temps réel (Ferentinos et al, 2006)

Au cours des dernières années, l'informatique a joué un rôle important dans le développement et la matérialisation des systèmes de contrôle des cultures en serre, En particulier, l'élaboration de méthodologies de l'informatique dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), qui ont été largement utilisées pour développer les systèmes intelligents

hautement sophistiqués pour le contrôle et la gestion en temps réel des installations en serre, où les approches mathématiques conventionnelles de contrôle sont difficilement applicables (Hashimoto et al, 1997). Les réseaux de neurones artificiels (NN) ont été l'outil le plus utilisé dans le contrôle intelligent de l'environnement de la serre et de la culture hydroponique. Leur principal avantage est qu'ils n'exigent pas une évaluation explicite des coefficients de transfert ou de toute formulation de modèle. Ils sont basés sur les capacités inhérentes d'apprentissage des données du processus à modéliser. Initialement NN ont été utilisés dans la modélisation de l'environnement aérien des serres, généralement ils sont utilisés comme les paramètres environnementaux extérieurs d'entrées (température, humidité, rayonnement solaire, vitesse du vent, etc.), les variables de commande et les variables d'état (consignes des plantes cultivées) (Seginer et al, 1994 and Kok. R et al, 1994) . Des modèles plus simples destinés aux serres vides, qui ne tiennent pas compte des conditions des plantes ont également été appliqués avec succès dans la modélisation de la température (Ferreira et al, 2002 and Frausto et al; 2004). Il convient de noter ici que les NN sont généralement une mauvaise extrapolation, ce qui signifie qu'ils ne fonctionnent pas de manière satisfaisante dans des conditions nettement différentes de celles des données de formation. Dans les systèmes hydroponiques, les réseaux de neurones ont été utilisés pour modéliser avec une grande précision le PH et la conductivité électrique de la solution nutritive dans les systèmes de culture en profondeur (Ferentinos et al, 2002), ainsi que le taux de photosynthèse des plantes cultivées (Frick et al, 1998). En outre, les NN ont été utilisés avec succès dans les applications de contrôle de l'environnement de serre (Seginer, 1997). Très récemment, leur combinaison avec les algorithmes génétiques (AG) dans la modélisation hydroponique a été prouvée, et a donné plus de succès que la modélisation des réseaux neuronaux conventionnels (Ferentinos,2005).

Les AG sont une autre technique de l'IA qui a été appliquée à la gestion et au contrôle des cultures en serre. Leurs capacités à trouver des solutions optimales dans les grands espaces de recherche complexes, ainsi que leurs capacités de conception innovantes inspirées par la simulation de l'évolution naturelle, en font des outils très puissants pour la conception et l'optimisation dans plusieurs applications d'ingénierie. Ils ont été utilisés comme un outil d'optimisation pour l'ajustement de contrôleurs de l'environnement de serre (Goggos et al, 2000), aussi comme des méthodologies de formation des modèles agricoles de réseaux neuronaux (Hashimoto et al, 2001) , ainsi Comme des optimiseurs qui déterminent des valeurs optimales de consigne (Morimoto et al, 1996) , Et comme optimiseurs d'autres contrôleurs (soft-computing-based) tel que les contrôleurs flous (Caponetto et al. 1990).

La logique floue est une technique intelligente couramment utilisée dans le contrôle avancé et la gestion des systèmes de cultures sous serres. Les processus complexes et les interactions de l'environnement de serre, font que ce genre de contrôle souple par l'application de la logique floue, soit un outil puissant, performant et réussi dans le contrôle précis de la gestion des systèmes- serres, (Kurata et al, 1990 and Salgado et al, 1998), ou en combinant avec des AG et les NN (Gates et al, 2001 and Chao et al, 2000). Il a été utilisé pour fournir une échelle supérieure entre différentes tailles de systèmes de production et de charges dans la commande de la ventilation (Zadeh, 1965) et dans les systèmes de chauffage et de la ventilation à étages dans les serres (Yen et al, 1999). Il a également été utilisé pour fournir des décisions de la gestion intelligente en temps réel de contrôle de l'environnement de la serre et de la culture hydroponique (Lafont et al, 2002).

a) Systèmes de logique floue et leurs applications (Koutb M et al, 2004)

La logique floue (FL) est une branche de l'intelligence artificielle, elle est la généralisation étendue de la logique classique à deux valeurs pour raisonner avec incertitude (Zadeh, 1965). Il est mis en œuvre des ensembles flous, ayant des limites non aiguës, et où la notion d'appartenance à un ensemble devient une question de degré. La logique floue offre l'avantage d'évaluer des données imprécises, car elle permet la mise en œuvre des connaissances générales (l'expérience des producteurs) en utilisant un langage naturel ou des variables linguistiques à travers des systèmes d'inférences capables de faire face à l'incertitude, et où les caractéristiques qualitatives et quantitatives peuvent être combinées pour modéliser des systèmes complexes. Les modèles basés sur des règles floues sont utilisés dans les systèmes de contrôle, la prise de la décision et de la reconnaissance des formes est d'autant plus précise que dans d'autres modèles. Des détails sur la théorie, l'histoire et les applications peuvent être trouvés dans les références de la logique floue (Piegat, 2001; Yen and Langari, 1999).

Dans les systèmes FL de la production de serres appliqués pour la modélisation (Lanfang et al., 2000; Salgado) et le contrôle (Castaneda-Miranda et al., 2006; Ehrlich et al., 1996), pour l'environnement ambiant, ainsi que pour modéliser des processus tels que la photosynthèse (Center and Verma, 1997) et la croissance des plantes (tomates) (Jenson, et al , 2004).

On explique brièvement la théorie des ensembles flous et ses applications aux systèmes dynamiques.

1) Ensembles flous et logique floue

Les termes linguistiques et les valeurs numériques sont classés en trois catégories, à savoir les singletons, les ensembles croustillants et les ensembles flous (Zadeh, 1965 et 1973). Il ya trois points notables qui sont associés avec eux. Tout d'abord, une quantité numérique nommée singleton, n'est pas une description souple des valeurs réelles. Deuxièmement, les ensembles croustillants pourraient être décrits par un groupe de singletons. Cette description est plus souple. Troisièmement, un terme linguistique flou peut être défini par une fonction d'appartenance pour représenter des valeurs réelles telles que la température ambiante, la pression de la chambre et le langage naturel (Yamakawat, 1993).

Un terme linguistique flou peut être considéré comme un ensemble flou qui est un ensemble de singletons avec des grades d'adhésion qui sont évalués de 0 à 1 (Zadeh, 1973). Les définitions des ensembles flous, de ses propriétés et de ses opérations sont résumées dans (Awad, 2001) . Le comportement dynamique d'un processus se caractérise par un ensemble de règles floues (relations) qui peuvent être construites à partir de nombreuses sources telles que la connaissance experte, des actions de commande de l'opérateur, des données extraites des informations de processus contrôlées et / ou de commande.

Ces règles floues prennent normalement la forme:

IF (un ensemble de conditions est satisfaite) THEN (un ensemble de conséquents peut être déduit).

Cette règle se compose de deux parties principales, un antécédent et un conséquent. Un système flou à multiples entrées (MISO) peut être décrit par un ensemble de règles comme par exemple :

IF x_1 est grand et x_2 est moyen et x_3 est grand THEN y est moyen

Où x_1 , x_2 , x_3 et y sont des variables linguistiques qui représentent respectivement trois variables d'état de processus et une variable de contrôle y . "Grand" et "Moyen" sont des ensembles flous des variables linguistiques dans l'univers du discours respectivement, U_1 , U_2 , U_3 et U_4 .

Un autre exemple de règle, mais cette fois dans le cas de Système Multi-entrées Multi-sorties (MIMO), est:

IF x_1 est grand et x_2 est moyen et x_3 est grand THEN y_1 est moyen et y_2 est grand

Cette règle peut être décomposée en deux règles, R_1 et R_2 :

R_1 : IF x_1 est grand et x_2 est moyen et x_3 est grand THEN y_1 est moyen.

R_2 : IF x_1 est grand et x_2 est moyen et x_3 est grand THEN y_2 est grand.

2) Architecture des systèmes de la logique floue

Bien que la théorie des ensembles flous ait été proposée en 1965, le lien entre celle-ci et la zone des systèmes de contrôle n'ont pas été introduit avant l'année 1974 (Mamdani, 1974). Depuis cette date, de nombreuses recherches ont été menées dans le domaine de l'identification et du contrôle des systèmes dynamiques (Batur et al., 1995; Li, 1999). Un contrôleur de la logique floue se compose essentiellement de quatre composants appelés interface de Fuzzification, une base de connaissances, un moteur d'inférence floue et une interface de defuzzification.

La figure (II.5) représente la configuration générale d'un système de logique floue. Ses composants sont décrits ci-dessous:

- **Interface de Fuzzification**

Une interface de Fuzzification a essentiellement le rôle de transformer les données Croustillant dans le domaine flou. Elle est décrite comme suit :

$$y = \text{Fuzz}(x) \text{ (II.4)}$$

Où x est une valeur nette d'entrée, y est un ensemble flou et $\text{Fuzz}(\cdot)$ est un opérateur flou.

L'interface de Fuzzification exécute généralement les fonctions suivantes: Mise à l'échelle de la plage des données d'entrée et de sortie dans les univers correspondants du discours. Fuzzification des données mises à l'échelle.

- **Base de connaissance**

La base de connaissances contient des informations sur le processus contrôlé et se compose de deux composantes, une base de données et une base de règles floues. La base de données comprend trois opérations, à savoir la quantification / normalisation des univers de discours, le partitionnement flou et la définition des ensembles flous.

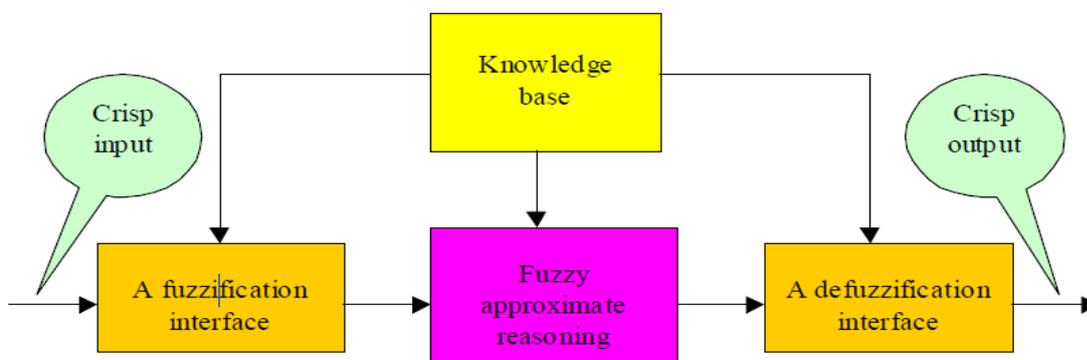


Figure (II.5) : Un système typique de la logique floue (Setiawan, 1998)

Le processus de la quantification est destiné à discrétiser des univers continus. La normalisation est adoptée pour traiter les grandes plages de données. Le partitionnement d'un univers de discours est effectué pour déterminer le nombre initial de sous-ensembles flous requis pour représenter cet univers.

Les ensembles flous sont généralement sélectionnés pour couvrir l'univers entier du discours. Ces ensembles flous peuvent être représentés soit sous la forme d'un vecteur, soit sous forme des fonctions telles que les fonctions d'appartenance en forme de triangle, de cloche et de la forme trapézoïdale. Il n'existe pas de méthode systématique pour décider de la forme et / ou du nombre des ensembles flous ou de leur degré de chevauchement. Ces paramètres dépendent fortement de l'expérience du concepteur.

La définition de base des règles floues comprend le choix des variables d'entrée et de sortie du processus contrôlé et un ensemble de règles floues qui décrivent la stratégie de contrôle dans le domaine de l'expertise. Les règles floues décrivent normalement le comportement du processus et / ou du contrôleur dans un système de commande par la logique floue. Les méthodes de dérivation pour ces règles floues sont la pierre angulaire dans un système de logique floue. Des méthodes ont été proposées pour obtenir les règles floues sur le processus contrôlé (Wang et Mendel, 1992; Pedrycz, 1993; Rojas et al., 2000)

1. Exploiter l'expérience de l'opérateur.
2. Copier les actions de contrôle de l'opérateur.
3. Utiliser les connaissances de l'ingénieur de contrôle.
4. Modélisation du processus contrôlé.

- **Raisonnement approximatif flou**

Le raisonnement approximatif flou est une méthode pour inférer une sortie floue basée sur un schéma d'inférence floue. Deux stratégies importantes de raisonnement approximatif flou sont respectivement le Modus Ponens généralisé (GMP) et le Modus Tollens généralisé (GMT) (Dubois et Prade, 1984; Lee, 1990).

Le modèle d'inférence de Mamdani suit fondamentalement la stratégie GMP. Il commence par un ensemble de données puis recherche des règles floues dans la base de connaissances dont les antécédents correspondent à ces données, puis déclenche les règles sélectionnées. Certaines propriétés du système GMP peuvent être trouvées dans (Fukami et al., 1980). Alors que la stratégie GMT commence par un objectif souhaité, elle tente d'établir les faits nécessaires pour le prouver en examinant les règles floues avec l'objectif souhaité comme une partie conséquente (Batur et al., 1995; Li, 1999). Certaines propriétés du système GMT sont énumérées dans (Li, 1999).

La stratégie de raisonnement approximative floue est le noyau des systèmes de contrôle par la logique floue. Il imite fondamentalement la pensée humaine. Sur la base d'un schéma d'inférence floue. La stratégie de raisonnement approximatif flou infère un ensemble de conclusions utilisant un ensemble de relations floues à partir de la base des règles qui décrivent un modèle de processus ou un contrôleur. La stratégie singleton est couramment utilisée dans les systèmes de contrôle pour l'inférence floue. En général, un schéma d'inférence floue dépend fortement des opérateurs de composition déjà utilisés. Dans la littérature, quatre principaux opérateurs de composition ont été décrits respectivement les opérateurs sup-min, sup-Product, sup-Bounded-Product et sup-drastique-Product (Zadeh, 1973; Larsen, 1980). Pour plus de clarté, Le minimum de Mamdani repose sur les règles de fonctionnement du produit de Larsen qui sont représentés dans la figure (II.6) et la figure (II.7).

- **Interface de defuzzification**

Une fonction de defuzzification fondamentalement mappe les résultats d'inférence floue comme décrit ci-dessus, à partir du domaine flou à des sorties croquantes dans un domaine croquant.

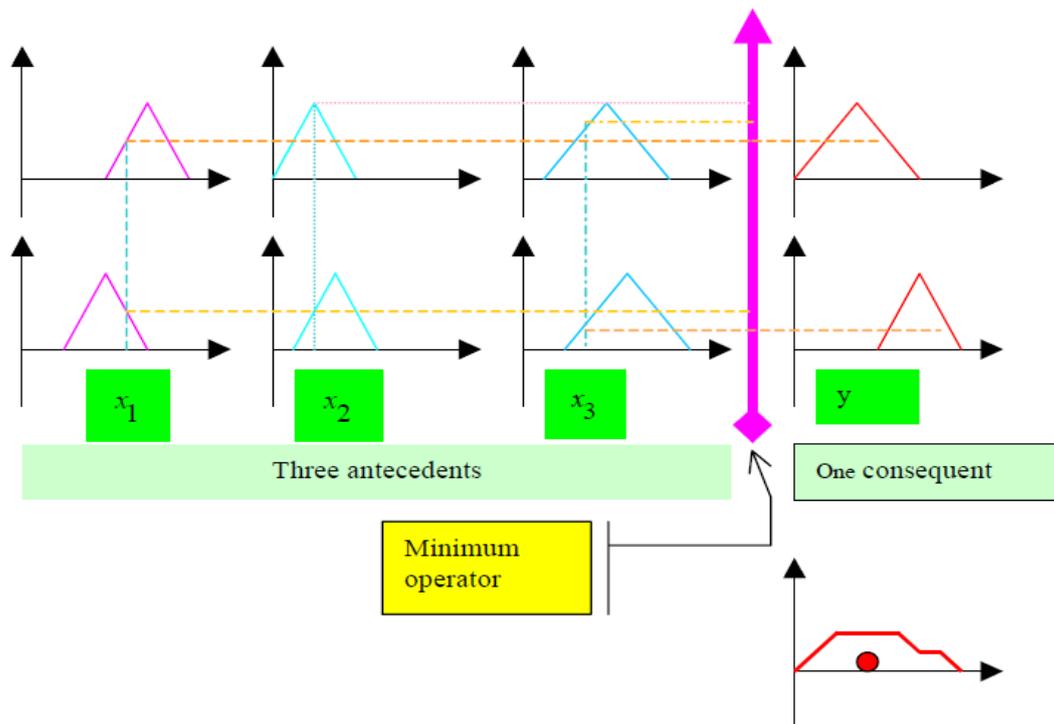


Figure (II.6) : Interprétation graphique de la règle minimale de Mamdani (Setiawan, 1998)

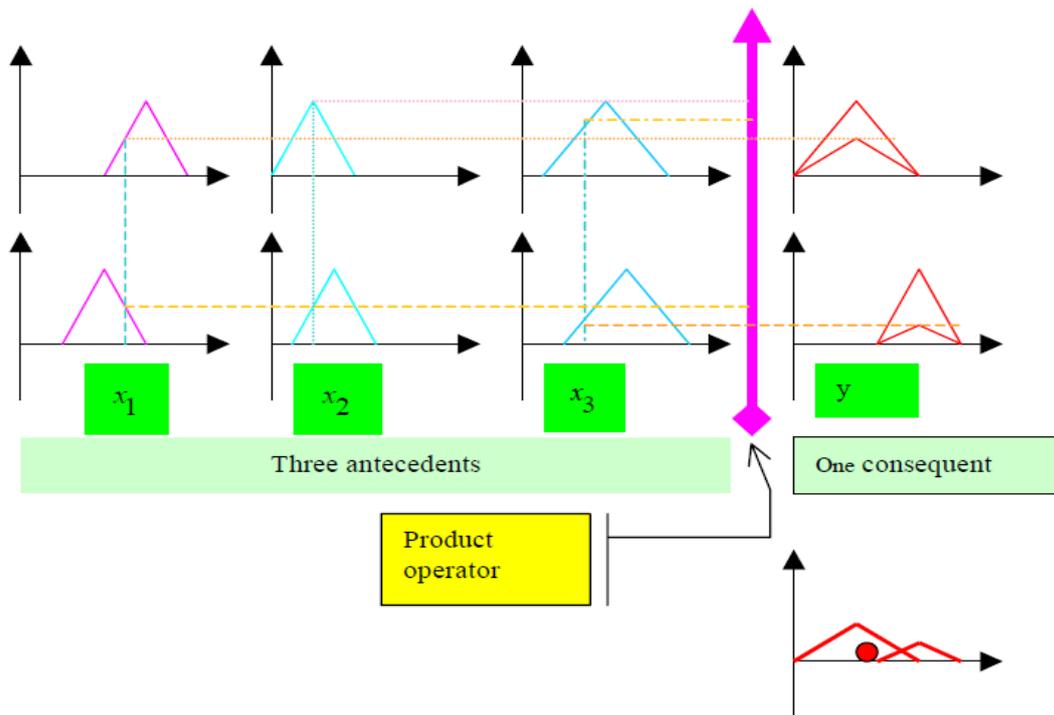


Figure (II.7) : Interprétation graphique de la règle de fonctionnement de Larsen
(Setiawan, 1998)

Ces sorties nettes représenteraient mieux l'action de la commande floue distribuée. Un défuzzificateur pour ce mappage peut être exprimé comme suit:

$$z = \text{Defuzz}(Y) \quad (\text{II.5})$$

Où z est l'action de contrôle nette, Y est l'ensemble flou qui représente la distribution de l'action de contrôle floue et $\text{Defuzz}(\cdot)$, Représente l'opérateur de défuzzification. Une stratégie générale pour décider de quelle méthode de défuzzification a adopté dans une application particulière qui n'existe pas. Les stratégies les plus utilisées pour résoudre les problèmes d'identification et de contrôle sont les stratégies de maximisation et d'approximation des cent roides. Parmi ces stratégies, il existe trois méthodes de défuzzification couramment utilisées. La première méthode est le critère maximal. Le critère max produit le point z dans l'univers de sortie Z qui a le degré maximum d'appartenance dans l'ensemble flou de sortie. Un problème se pose avec cette méthode lorsque plus d'un élément de Z possède cette valeur maximale et donc z n'est pas déterminé de façon unique. La deuxième méthode est la moyenne de Maxima (MOM). S'il y a plus d'un élément dans Z possédant la valeur d'appartenance maximale, Alors MOM produit la valeur moyenne des maxima. Dans l'univers discret du discours, l'action de contrôle nette z peut être exprimée comme suit:

$$z = \sum_{j=1}^m \frac{W_j}{m} \quad (\text{II.6})$$

Où W_j représente la valeur de support à laquelle la fonction d'appartenance atteint la valeur maximale et m la cardinalité de la carte (Z) = m .

Cependant, la MOM ne prend pas en compte les règles tirées au-dessous du niveau maximum (Saade, 1996). Le troisième est la méthode la plus utilisée appelée le centre de zone (COA). COA tente de surmonter l'inconvénient de MOM en considérant des règles qui peuvent être tirés au-dessous du niveau maximum. COA génère le centre de gravité z de la possibilité de distribution d'une action de contrôle comme suit:

$$\frac{\sum_{k=1}^n \mu(w_k) * w_k}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (\text{II.7})$$

Où n est le nombre de niveaux de quantification d'un univers Z et w_k est le point du $k^{\text{ème}}$ niveau de quantification dans un univers Z où $\mu(w)$ atteint sa valeur maximale (w_k).

Le COA approximatif est donné par:

$$u = \frac{\sum_{k=1}^m \alpha_k * C_k}{\sum_{k=1}^m \alpha_k} \quad (\text{II.8})$$

Où α_k est la force de tir de la $k^{\text{ème}}$ règle floue, C_k est le centre (ou la moyenne) de la K fonction d'appartenance et m est le nombre de règles floues tirées.

II.2.3) Systèmes de logique floue en contrôle

Les systèmes de logique floue peuvent principalement être classés en deux types, statiques et adaptatifs.

A) Systèmes statiques de la logique floue

Les exploitants humains expérimentés sont la principale source d'information lors du contrôle par la logique floue. En conséquence, un tel contrôleur appartient à la classe des contrôleurs basés sur la connaissance. Des efforts ont été faits pour obtenir la meilleure base de connaissances pour le processus contrôlé (Takagi et Sugeno, 1983). La base de connaissances comprend une base de données et un ensemble de règles floues comme mentionné précédemment. Les règles floues ne sont pas mises à jour dans ce schéma pendant la période de contrôle, et par conséquent, le schéma est appelé contrôle de logique floue statique.

B) Systèmes adaptatifs de la logique floue

Bien que le système de contrôle par la logique floue statique soit capable de traiter des processus mal définis, Il n'a pas d'adaptation en ligne et donc il ne peut pas faire face à de grands changements qui peuvent se produire pendant le fonctionnement du système contrôlé. Le schéma de commande de logique floue adaptative effectue une adaptation en ligne de la base de règles et surmonte donc les inconvénients du schéma statique. Il modifie trois éléments principaux d'un système de logique floue, les fonctions d'appartenance, la base de règles floues et les facteurs d'échelle, pour produire un système flou robuste. Ces éléments influencent fortement sur la performance d'un contrôleur de logique floue (Saade, 1996) [160]. En général, il existe deux stratégies importantes de contrôle flou adaptatif pour modifier ces éléments, à savoir les stratégies directes et indirectes (Moore, 1991; Moore et Harris, 1994).

II.2.4) Caractéristiques et applications des systèmes de logique floue

En raison des caractéristiques intrinsèques de la théorie des ensembles flous, on a assisté à une croissance rapide de l'utilisation de systèmes de logique floue pour contrôler les processus complexes et mal définis. Ces caractéristiques peuvent être résumées comme suit. Tout d'abord, un système de logique floue transpose de manière transparente la dynamique du processus. En second, contrairement aux systèmes de contrôle conventionnels, il s'agit d'un outil permettant de modéliser de manière compréhensible les phénomènes associés à la pensée et à la perception humaine. Troisièmement, il a une structure simple. Grâce à ces caractéristiques, les techniques de la logique floue ont la capacité de faire face à différents types de données disponibles, telles que des valeurs numériques et des informations linguistiques.

Depuis 1974, le contrôle des processus est devenu un domaine d'application très fertile pour la théorie des ensembles flous. Exemples d'applications basées sur des systèmes de logique floue:

1. Manipulation des bras de robot (Lin et Lee, 1993).
2. Contrôle du bain chimique (Dohmann, 1994).
3. Contrôle d'un système d'alimentation en eau dans une centrale nucléaire (Iijima et al., 1995) .
4. Contrôle d'une antenne de localisation par satellite embarquée (Tseng et Teo, 1998).
5. Amélioration du contrôle d'un réacteur nucléaire à eau sous pression (Fodil et al., 2000) .
6. Contrôle de l'environnement végétal et animal (température) (Gates et al., 1999) .

II.2.5) Contrôle adaptatif

Si un contrôleur ajuste la stratégie de contrôle sans intervention humaine, donc il est adaptatif. Dans la conversation quotidienne pour adapter les moyens de modifier en fonction des circonstances changeantes, par exemple: Ils se sont adaptés au climat plus chaud. Un contrôleur adaptatif est donc intuitivement un contrôleur qui peut modifier son comportement après des changements dans l'installation contrôlée ou dans l'environnement.

Les contrôleurs adaptatifs sont essentiels dans le domaine de la climatisation des serres, car les serres sont continuellement exposées à des conditions climatiques changeantes. Par exemple, la dynamique d'une serre change avec l'évolution de la vitesse et de la direction de l'air extérieur, Le climat extérieur tel que la température de l'air, l'humidité et la concentration de CO₂, l'altitude de la serre et l'effet thermique sur la croissance de la plante à l'intérieur de la serre. Par conséquent, la serre se déplace entre différents points de fonctionnement dans la saison de croissance et le contrôleur est conscient artificiellement des conditions de fonctionnement et s'ajuste aux nouvelles données. La recherche en matière de contrôle adaptatif a débuté au début des années 1950. Un contrôleur adaptatif se compose de deux boucles: une boucle de commande et une boucle de réglage de paramètre (Figure (II.8)). Le modèle de système adaptatif de référence (MRAS) est un système adaptatif dans lequel les spécifications de performance sont données par un modèle de référence (figure (II.9)). En général, le modèle renvoie la réponse désirée y_m à un signal d'ordre μ_c . Les paramètres sont modifiés en fonction de l'erreur du modèle, Qui est la déviation de la réponse de la plante par rapport à la réponse souhaitée.

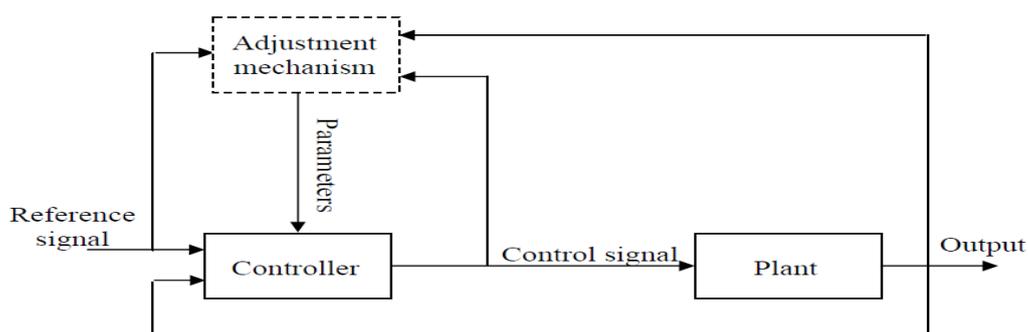


Figure (II.8) : Système de contrôle adaptatif. La boucle intérieure (ligne pleine) est une boucle de régulation de retour ordinaire autour de la plante. La boucle extérieure (ligne pointillée) règle les paramètres du contrôleur (Rosenblatt, 1958)

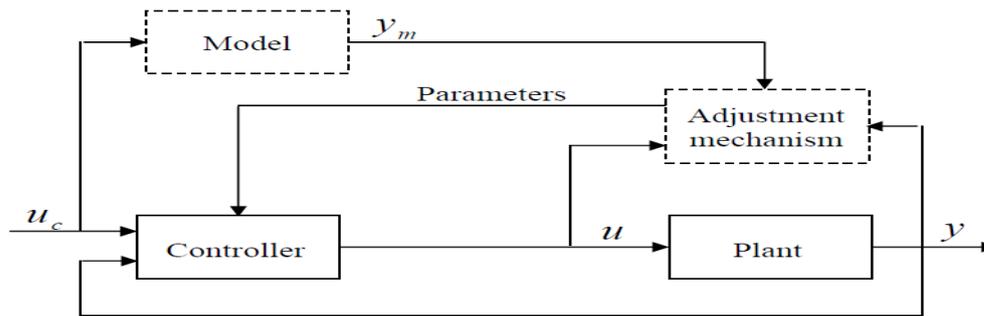


Figure (II.9) : Modèle adaptatif de référence (MRAS). La boucle extérieure (ligne en pointillés) ajuste les paramètres du contrôleur de sorte que l'erreur $e_m = y_m - y$ se rapproche de zéro (Rosenblatt, 1958)

II.2.6 Réseaux de neurones sur les systèmes de serres

Les réseaux de neurones computationnels sont des représentations mathématiques de façon à ce que les neurones biologiques traitent l'information en tant qu'unités de calcul parallèle. Ils se sont révélés être un outil puissant pour résoudre plusieurs types de problèmes dans des différents domaines où l'approximation des fonctions non linéaires, la classification, l'identification et la reconnaissance des formes étaient nécessaires.

En général, il existe deux types d'architectures de réseaux neuronaux:

- Réseaux neuronaux statiques (feedforward), où il n'y a pas de retours ou de retards.
- Réseaux neuronaux dynamiques dont les sorties dépendent des entrées courantes ou précédentes, les sorties ou les états du réseau.

L'une des architectures de réseaux neuronaux les plus couramment utilisés est le perceptron multicouches (MLP), qui a été prouvée pour approximer pratiquement n'importe quelle fonction continue sur un sous-ensemble compact de \mathbb{R}^n , si on leur donne suffisamment de couches cachées et des neurones à l'intérieur. Un MLP est une structure de mappage d'un espace d'entrée exécuté \mathbb{R}^n dans un espace de sortie \mathbb{R}^m en ajustant les poids de connexion, reliant chacun des éléments d'entrée aux neurones dans les couches cachées et à travers la couche de sortie. Trouver le nombre approprié de couches cachées, et les neurones dans chaque couche, à ce moment là, les méthodes d'ajustement de poids, constituent la procédure de conception de réseaux neuronaux. Trouver une combinaison de celles-ci qui se rapproche le mieux de la solution du problème est un processus heuristique qui dépend du problème et du type des données traitées.

A) Réseaux de neurones feedforward

a) Perceptron multicouches

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 (II.10)).

Mathématiquement, le fonctionnement d'un MLP pourrait être représenté par:

$$\hat{f}_k(x) = \sum_{i=1}^N W_{kj} * \rho\left(\sum_{i=1}^p W_{ji} X_{ji} + B_j\right) + B_k \quad (\text{II.9})$$

Où :

$\hat{f}_k(x)$ Est la k^{ème} sortie du réseau, X est la i^{ème} entrée, ρ 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.

Les choix les plus utilisés pour $\rho(.)$ sont la tangente hyperbolique et les fonctions sigmoïdes. Un MLP met en œuvre une cartographie non linéaire qui peut approximer une fonction continue jusqu'à un degré prédéterminé d'exactitude. Les réseaux MLP présentent de nombreux inconvénients. Le principal inconvénient est que, dans la pratique, ces réseaux ne sont pas des agents d'approximation universels. En d'autres termes, si la région d'exploitation d'un système réel subit des changements, Le comportement du réseau MLP sera déformé en raison de sa fonction de support global. Cela signifie pour que le MLP fonctionne correctement, alors tous les poids devront être modifiés. Cela est vrai parce que la formation d'un réseau MLP est essentiellement une fonction d'optimisation non linéaire. Cette optimisation est habituellement effectuée en utilisant l'algorithme d'erreur retro-propagation (BP) et tous les poids doivent être modifiés. En bref, Ce type de réseau manque de plasticité. Cela signifie que l'apprentissage de nouvelles informations entraîne la destruction des données stockées précédemment.

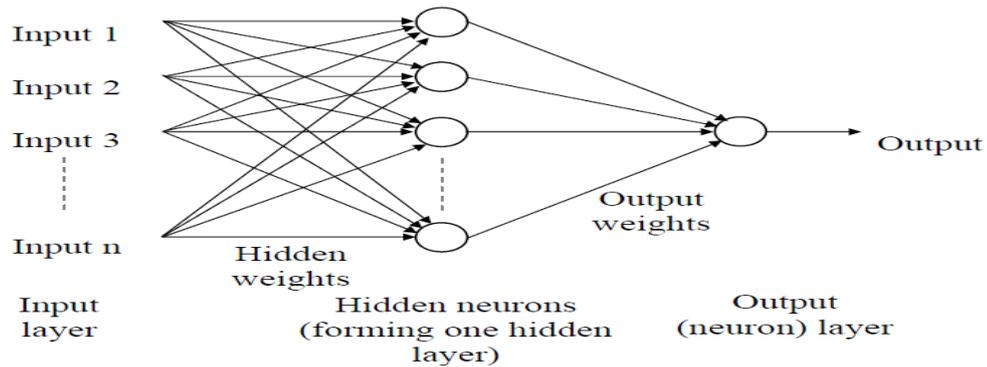


Figure (II.10) : Représentation schématique d'un réseau neuronal feedforward entièrement connecté avec une couche cachée et une seule sortie. (Rosenblatt, 1958)

b) 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.

1) 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. L'ajout d'un terme de mode du moment ou momentum à 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.

Mathématiquement, chaque poids, W_{ji} , est modifié selon l'équation suivante (Haykin, 1994):

$$\Delta w_{ij}(k+1) = -\zeta * \frac{\partial E^{(k+1)}}{\partial \Delta w_{ij}(k+1)} + \mu * \Delta w_{ij}(k) \quad (\text{II.10})$$

Où :

$$E = \frac{1}{2} (y_d - \hat{y})^2 \quad (\text{II.11})$$

Telque :

y_d et \hat{y} sont les sorties souhaitées et réelles du réseau, Et ζ et μ sont respectivement le taux d'apprentissage et le coefficient de momentum.

2) 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.

3) 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.

B) 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.2.7) Techniques modernes d'optimisation

Ces dernières années, plusieurs techniques de recherche heuristique ont été développées pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire. Le mot «heuristique» vient du mot grec «heuriskein» qui signifie «découvrir ou trouver» et qui est aussi l'origine de «Eureka», et issue de la prétendue exclamation d'Archimède, «Heurika» «je l'ai trouvé», elle a été prononcée quand il avait découvert la méthode pour déterminer la pureté de l'or (Polya, 1957). Cependant, trois méthodes, qui vont au-delà des simples techniques de recherche locale et deviennent particulièrement connues comme des techniques d'optimisation globale, (Kirkpatrick, 1983), Tabu recherche (Glover, 1989, 1993, 1999), et les algorithmes génétiques (Goldberg, 1989). Ces méthodes sont toutes issues au moins en partie d'une étude des processus naturels et physiques qui effectuent une analogie d'optimisation (Reeves, 1996). Ces méthodes, sont utilisées pour optimiser une fonction objective avec de multiples variables. Les paramètres des variables sont ensuite modifiés de façon logique ou "intelligente" et présentés à la fonction d'objectivité pour déterminer si cette combinaison de paramètres de variables entraîne une amélioration ou non.

A) 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.

La structure de GA est assez simple. L'AG commence par la génération aléatoire des chaînes de population initiale, et l'évaluation de chaque chaîne de conditionnement physique. L'algorithme procède en sélectionnant, selon la stratégie utilisée, deux solutions «parentales», échangeant des portions de leurs cordes et générant ainsi deux solutions «descendantes». Ce processus est appelé un «croisement». Le processus est répété jusqu'à ce que la nouvelle taille

de population soit terminée. La sélection d'un chromosome est généralement basée sur son aptitude par rapport à l'aptitude d'autres chromosomes dans la population. Dans chaque génération, relativement les «bons» chromosomes (solutions) sont plus susceptibles de survivre et de produire des descendants, et les «mauvais» chromosomes sont condamnées à mourir. Pour assurer une variété supplémentaire, l'opérateur mutation agit avec une petite probabilité sur le croisement pour la commutation aléatoire d'un ou plusieurs bits. Enfin, la nouvelle population remplace l'ancienne (première). Cette procédure se poursuit jusqu'à ce qu'une certaine condition de finalisation soit atteinte. Un organigramme simple d'un GA est présenté dans la Figure (II.11).

Il existe plusieurs aspects dans lesquels les AG diffèrent des autres techniques de recherche:

- 1) Les GAs optimisent le compromis entre explorer de nouveaux points dans l'espace de recherche et exploiter les informations découvertes jusqu'à présent.
- 2) Les GAs ont la propriété du parallélisme implicite qui signifie que l'effet GAs est équivalent à une recherche étendue d'hyperplans de l'espace donné, sans tester directement toutes les valeurs des hyperplans.
- 3) Les AGs sont des algorithmes randomisés, en ce sens qu'ils utilisent des opérateurs dont les résultats, sont régis par la probabilité. Les résultats de ces opérations sont basés sur la valeur d'un nombre aléatoire.
- 4) Les AGs fonctionnent sur plusieurs solutions simultanément, recueillant des informations à partir des points de recherche actuels pour diriger la recherche ultérieure. Leur capacité à maintenir simultanément plusieurs solutions rend les AGs moins sensibles aux problèmes de l'optimum local.

Au cours de ces dernières années, l'intérêt pour les AGs a augmenté rapidement. Les chercheurs interviennent dans divers domaines tels que l'informatique, l'ingénierie et la recherche opérationnelle.

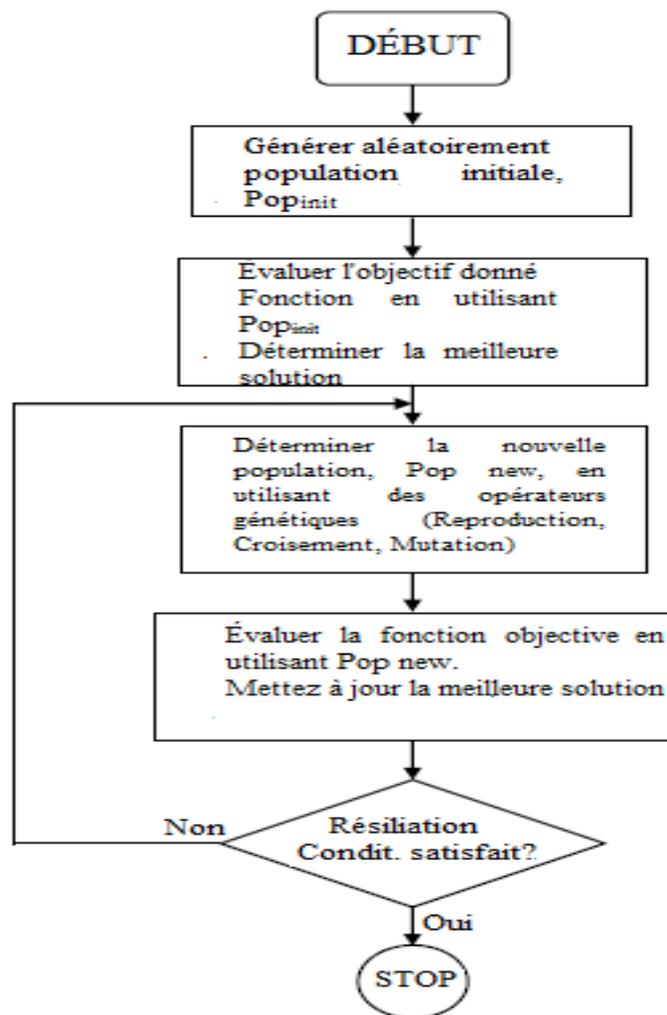


Figure (II.11) : Organigramme d'algorithme génétique

B) 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 intrinsèquement 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.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 (II.1) regroupe les avantages et les inconvénients de la logique floue et des réseaux de neurones.

Les systèmes neurone-flous sont créés pour synthétiser les avantages et surmonter les inconvénients des réseaux neuronaux et des systèmes flous.

Les algorithmes d'apprentissage peuvent être employés pour déterminer les paramètres des systèmes flous. Ceci revient à créer ou à améliorer un système flou de manière automatique, au moyen de méthodes spécifiques aux réseaux neuronaux.

Un aspect important est que le système reste toujours interprétable en termes de règles floues, vu qu'il est basé sur un système flou.

Tableau (II.1) : Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurones

Réseaux de neurones	Logique floue
Avantages	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le modèle mathématique non requis ▪ Aucune connaissance basé sur les règles ▪ Plusieurs algorithmes d'apprentissage sont disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le modèle mathématique non requis ▪ La connaissance antérieure sur les règles peut être utilisée ▪ Une interprétation et implémentation simple
Inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Boite noire(manque de traçabilité) ▪ L'adaptation aux environnements différents est difficile et le réapprentissage est souvent obligatoire(sauf pour RBF) ▪ La connaissance antérieure ne peut pas être employée (apprentissage à partir de zéro) ▪ Aucune garantie sur la convergence de l'apprentissage. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les règles doivent être disponibles ▪ Ne peut pas apprendre Adaptation difficile au changement de l'environnement ▪ Aucune méthode formelle pour l'ajustement

II.4) Identification floue

Dans le contexte du contrôle, l'identification se réfère à la détermination d'un modèle qui est suffisant pour permettre la conception d'un contrôleur climatique du système. L'identification des systèmes linéaires invariables dans le temps est effectuée directement par des méthodes conventionnelles (Ljung, 1987), de sorte que les techniques d'identification floue ne suivent pas de tels systèmes. Les techniques floues sont utiles pour l'identification de systèmes non linéaires, surtout si la forme de la non-linéarité n'est pas connue.

L'identifiant prend des mesures de l'entrée et de la sortie de la serre, et lui détermine un modèle. En effet, il "suffit" de déterminer les paramètres du contrôleur (règles, forme des fonctions d'appartenance, position des fonctions d'appartenance, ...etc.), pour résoudre le problème d'optimisation non linéaire.

L'idée générale d'ANFIS est d'intégrer dans un seul concept les avantages des deux domaines : Logique floue et Réseaux de neurones (Roger Jang, 1993).

- **De la logique floue** : Introduction de connaissances a priori pour réduire l'espace des paramètres à optimiser.
- **Des réseaux de neurones** : Utilisation de la méthode d'optimisation "back propagation".

La première utilisation est bien entendu d'obtenir un modèle implantable dans un calculateur d'un système non linéaire. L'interprétation de ce modèle est encore soumise à caution.

La synthèse d'un régulateur, flou ou pas, obtenue à partir d'une identification floue, fait partie des thèmes actuels de la recherche scientifique. Pour l'instant aucune méthodologie claire ne s'est dégagée. Une autre application est assez courante, il s'agit de l'identification des correcteurs plus classiques. En effet, la synthèse de correcteurs flous est assez "floue". Aussi, certains auteurs préconisent l'identification d'un correcteur classique par un système flou et l'étendre à de nouvelles fonctions d'appartenance et de nouvelles règles.

La synthèse d'un correcteur suit l'algorithme suivant :

1. Synthèse d'un correcteur linéaire autour du point de fonctionnement,
2. Identification floue de ce correcteur,
3. Ajout de règles et/ou de prémisses pour l'étendre au domaine de bon fonctionnement.

Une autre méthode donnant de bons résultats, consiste à simuler le processus à commander précédé d'un correcteur flou, puis à optimiser les paramètres de ce correcteur ou en fonction de performances attendues en boucle fermée.

II.5) Conclusion

Comme mentionné dans les sections précédentes, on peut dire que les contrôleurs flous ont des structures de types différents. En outre, les composants d'un contrôleur flou ont plusieurs parties, telles que: nombre ; type ; position des fonctions d'appartenance d'entrée et de sortie; Les gains d'entrée et de sortie; Et les règles. Ces variations dans la structure du contrôleur ont des effets significatifs sur les performances du contrôleur flou.

Les problèmes des contrôleurs flous ont été partiellement abordés par de nombreux chercheurs dans le contexte de leurs applications. En raison de la non-linéarité, de l'incohérence des contrôleurs flous, des difficultés se sont apparues lorsque des tentatives ont été faites pour concevoir un contrôleur de logique floue à usage général.

Bien que des recherches précieuses aient été menées sur la conception d'algorithmes d'autoréglage pour les contrôleurs flous, il existe encore un déficit d'étude et de conception empirique ou analytique couvrants la méthode d'autoréglage systématique. En outre, la plupart des algorithmes s'impliquent l'accordage de plusieurs paramètres de contrôleurs qui rendent le processus en accord complexe. De plus, la définition claire des paramètres physiques, a été négligée, comme c'est le cas dans le contrôleur PID (Visioli, 2006).

En effet, des efforts de réglage restent limités et locaux pour un contrôleur qui conserve les connaissances pour une utilisation future et les partagent avec les contrôleurs identiques à tâches similaires.

Dans notre travail, nous avons modélisé un contrôleur intelligent par la logique floue en s'inspirant de la méthode de Mamdani afin d'optimiser la gestion climatique du microclimat de la serre agricole.

CHAPITRE III

Modélisation et Simulation

Climatique intelligente

Du système-serre

Dans ce chapitre, nous établissons les équations générales régissant le système "serre- cultures ", en régime dynamique. A partir des modèles disponibles dans la littérature .Le choix d'un modèle simplifié assez réaliste, définissant le comportement de l'ensemble "serre- cultures ". C' est bien ce modèle qui sera utilisé pour la modélisation du contrôleur intelligent par application de la .logique floue, c'est un moyen puissant, pour optimiser et faciliter la gestion climatique de la serre moderne , tout en optant pour la simulation du climat du système-serre à travers les données de deux régions humide et aride, et optimiser les valeurs des variables d'état favorables à la croissance et au développement de la culture sous abris.

III.1) Principes de base

L'étude physique de la serre couvre tous les processus physiques intervenants dans son fonctionnement. Elle est donc un préalable à l'élaboration d'un modèle mathématique.

Les bilans énergétiques représentent les règles d'évolution du modèle, ils traduisent le principe de la conservation de l'énergie.

Chaque élément du système peut donc être représenté par une équation du bilan d'énergie qui, sous sa forme générale s'écrit :

$$\mathbf{ENERGIE\ RECUS - ENERGIE\ PERDUE = VARIATION\ D'ENERGIE\ INTERNE}$$

Le second membre traduit un terme différentiel par rapport au temps qui caractérise l'inertie du système. Si les variables d'état changent rapidement, l'inertie du système est faible et le cas contraire entraîne une inertie forte

Les échanges énergétiques seront considérés comme étant régis par les lois physiques de transfert : conduction, convection, rayonnement, échange de masse etc. (Travaux de N. BIBI- TRIKI).

Nous allons tout d'abord passer en revue les principaux types des modèles qui sont déjà publiés dans la littérature (Boaventura Cunha, 2003); (Raczek, 2012); (B. H. E. Vanthoor , 2011); (H. F. De Zwart ,1996); T. G. Salazar (2010); (A. F. Miguel, N. J. van de Braak, A. M. Silva, G. P. A. Bot , 1998); (W. F. F. Ilahi (2009); (T. Boulard, A. Baille, 1995); (Jamisson M.Hill, 2006); (J. J. Prenger, P. P. Ling); (K. Rafferty , 1998); (V.P. Sethi, S.K. Sharma , 2007); (C. Stanghellini, 1987); (Wachowicz, 2006); (Marco Binotto, 2014); (Ooteghem,2007); (Bot , 1983); (Jong, 1990); (Anna Raczek et Ewa Wachowicz, 2014); (Tap, 2000); (Kurpaska, 2006); (Kurpaska, 2007); (T. Boulard, S. Wong 2002); (Heuvelink, 2005); (Boaventura Cunha, J. 2003) .

Il existe de nombreux modèles qui permettent de simuler et modéliser le comportement thermique et énergétique d'une serre agricole. Le principe de calcul, fondé sur la notion du bilan, est toujours le même, mais l'approche du problème est différents selon les objectifs des chercheurs : Modélisation dynamique du bilan énergétique, du bilan massique des serres, contrôle du microclimat de la serre etc....

Ces modèles considèrent que la serre est composée de plusieurs compartiments (la couverture, l'écran, l'air intérieur environnant, la végétation, le sol et les équipements d'accompagnements (systèmes de chauffage, de refroidissement, de ventilation, etc.) pour lesquels on établit les équations du bilan thermo-énergétique et massique du système.

III.2) Hypothèses simplificatrices principales et Modélisation de la serre

Dans la figure (III.1), tous les paramètres modélisés ont été schématisés. Les cases grises indiquent les températures de consigne calculées (variables d'état) alors que les cases blanches représentent les variables indépendantes aléatoires liées au modèle avec un fichier externe.

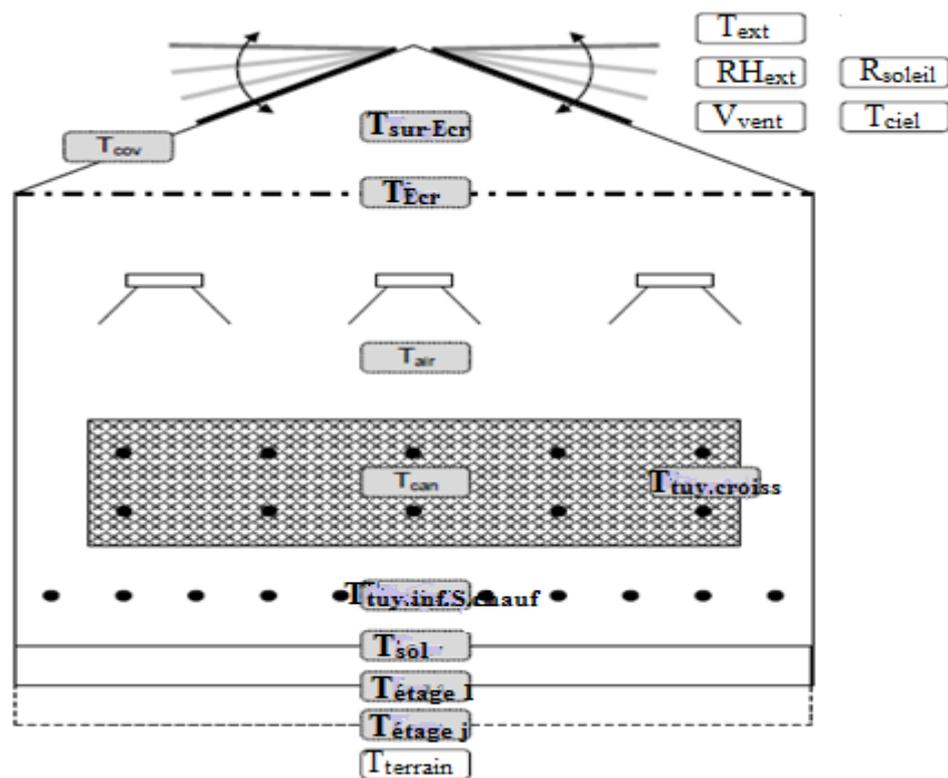


Figure (III.1) : Schéma de la serre modélisée.

III.3) Hypothèses simplificatrices principales

La serre peut être considérée comme un milieu très confiné où plusieurs composants s'échangent entre eux. Tous les modèles de serres sont basés sur l'hypothèse que les compartiments constitutifs (parois, air; sol, couverture, végétation...) sont homogènes du point de vue des variables d'état (température, humidité etc.) qui les caractérisent.

Notre modèle repose sur les hypothèses suivantes :

Les conditions climatiques extérieures (boîtes blanches sur la figure III.1) ne sont pas influencées par le climat intérieur de serre.

Chaque travée dans la serre a la même disposition par rapport à la configuration des conduites de chauffage, Le système d'éclairage artificiel, l'écran noir et sa taille.

L'air de la serre est considéré comme un "réservoir parfaitement agité", ce qui signifie qu'il n'y a pas de gradient de température ni de différence de concentration en vapeur d'eau; Donc tous les flux du modèle peuvent être décrits par mètre carré et mètre cube.

Pour décrire l'effet de l'écran de coupure, le volume entier de la serre est divisé en deux compartiments: un en dessous et l'autre au-dessus de l'écran.

Les pertes de chaleur à travers les parois sont négligées ce qui signifie que les parois des zones simulées sont considérées adiabatiques. Bien que certains flux d'air entre les zones puissent se produire, en raison de la présence d'écrans sur le côté, il est supposé que ces flux d'air ne sont pas pertinents pour le climat intérieur.

L'échange de chaleur et de l'humidité à travers les ouvertures d'écran peut être décrit par un simple taux d'échange d'air avec la température la plus élevée au nœud d'air du refroidisseur. L'écran est traité comme un support poreux.

Tous les éléments modélisés (variables d'état) sont homogènes: ils ont une température uniforme et une capacité thermique moyenne qui peut être utilisée.

Le système de chauffage inférieur se trouve sous la canopée. Les tuyaux sont entre les plantes, donc tous les rayonnements thermiques émises sont absorbés par la canopée.

Les tuyaux de chauffage sont définis par leur longueur et leur diamètre. La température de l'eau peut être décrite par des équations simplifiées. Dans ces équations, on suppose qu'une température peut être utilisée pour décrire la teneur en énergie du filet. Cette température dépend de la température d'entrée, qu'on appelle température de départ, qui peut être calculée par les termes d'échange de chaleur. Pour éviter tout résultat irréal, une limite supérieure de la température des tuyaux a été fixée à 90 ° C.

Le rayonnement transmis et réfléchi, est émis sous la forme unidimensionnel, normal à la surface du sol, Cette hypothèse est également étendue aux rayonnements solaires, et

l'effet d'irradiation qui est supposé sur un plan horizontal. Par conséquent, lorsque nous considérons les flux de rayonnement, tous les éléments sont comme une surface plane parallèle au plancher avec des propriétés optiques constantes.

Le flux d'air dans l'ouverture de ventilation du toit n'est pas influencé par la position des événements, d'où une vitesse moyenne du vent, indépendante de sa direction, est utilisée.

L'eau qui se condense sur la face intérieure du toit et sur l'écran noir est supposée inexistante. Les propriétés optiques de ces surfaces ainsi que leurs propriétés thermiques ne sont pas modifiées même en présence d'un film d'eau condensée.

III.4) Modélisation de la serre

Le microclimat de la serre est le résultat d'une combinaison de mécanismes complexes impliquant des processus de transfert de chaleur et de masse se produisant dans la serre, entre l'intérieur de la serre et son environnement.

Les processus qui se produisent en serre sont non linéaires, ils sont liés les uns aux autres. Lors de la formulation d'un modèle mathématique de ces procédés, des équations de la chaleur et des bilans massiques de l'air à l'intérieur de la serre devraient être formulées d'après (Wachowicz, 2006).

Notre modèle est basé sur l'étude de la modélisation du climat de serre de (Marco Binotto, 2014) qui est basé sur le modèle de (Vanthoor, 2011) et (Ooteghem, 2007) Qui sont tous basés sur le modèle de (Zwart, 1996), (Bot, 1983) et (Jong, 1990), Ces études ont créé et développé des modèles dynamiques et les modes de simulation mise au point par de nombreux auteurs parmi eux (Jamison M. Hill, 2006), qui a développé le modèle Simulink pour des systèmes de cultures sous serre agricole (système de chauffage, de refroidissement, de ventilation, etc.) et qu'on a adopté comme étant la base de nos travaux et créer par la suite notre propre modèle.

Dans notre modèle, certaines parties ont été simplifiées, d'autres ajoutées ou modifiées.

En raison du maniement facile des sorties issues des blocs MATLAB SIMULINK, nous avons développé notre propre modèle sur ce logiciel.

Notre modèle est mis en bloc de paramètres (variables d'état), signifiant que l'hétérogénéité spatiale est ignorée et que le contenu interne des flux aux limites de la frontière du système est uniformément distribué.

Pour la serre agricole ces variables d'état sont représentées à travers la température intérieure, humidité relative, ...etc.

Le modèle consiste à un ensemble d'équations différentielles formulées comme suite :

$$cap * \frac{\partial T}{\partial t} = \sum (puissance_{int} - puissance_{ext}) \text{ [W]} \quad (III.1)$$

Où :

T : Est la température de l'élément considéré [C°].

cap[J K⁻¹] :Est sa capacité thermique et la puissance thermique entrante et sortante sont exprimés en watts.

III.4.1) Modèle de Bilan thermique

Le changement de la température de l'air à l'intérieur de la Serre peut être présenté sous la forme de l'équation du bilan thermique (Anna Raczek et Ewa Wachowicz, 2014):

$$\frac{dT_{airint}}{dt} = \frac{1}{\rho_{airint} c_{airint} V_{serre}} (Q_{int \rightarrow cov} + Q_{tuy \ de \ chauff} + R_{solaire} - Q_{ventilation} - Q_{transp.plante} + Q_{cond}) \quad (III.2)$$

Où :

dT_{airint} : Dérivée de la Température de l'air à l'intérieur de la serre [K].

ρ_{airint} : Densité de l'air à l'intérieur de la serre [kg.m⁻³].

c_{airint} : Chaleur spécifique de l'air à l'intérieur de la serre [J.kg⁻¹.K⁻¹].

V_{serre} : Volume de la serre agricole [m³].

$Q_{int \rightarrow cov}$: Flux d'échange thermique entre l'air intérieur et la couverture [J.s⁻¹].

$Q_{tuy \ de \ chauff}$: Le flux de chaleur transféré par les tuyaux de chauffage [J.s⁻¹].

$R_{solaire}$: Flux de chaleur fourni par le rayonnement solaire [J.s⁻¹].

$Q_{ventilation}$: Flux de chaleur créée par la ventilation [J.s⁻¹].

$Q_{transp.plante}$: Flux de chaleur échangé par la transpiration de la plante [J.s⁻¹].

Q_{cond} : Flux thermique dû à la condensation [J.s⁻¹].

Les composants du bilan thermique sont des flux de chaleur fournis à la serre : dû à la condensation de la vapeur d'eau sur la couverture, des tuyaux de chauffage, du rayonnement solaire et des flux de chaleur échangés pendant la ventilation, suite à la transpiration des plantes.

La plupart des flux thermiques convectifs échangés entre les différentes parties de la serre et l'air intérieur dépendent des coefficients de transfert de chaleur, et du gradient de température entre la surface des éléments et l'air. Ces flux décrivent Les équations suivantes:

Pour l'échange de chaleur par convection entre l'air intérieur de la serre et la couverture, l'équation aura pour expression :

$$Q_{int \rightarrow cov} = \alpha_{int \rightarrow cov} A_{cov} (T_{cov} - T_{air}) \text{ [W]} \quad (\text{III.3})$$

Où :

$\alpha_{int \rightarrow cov}$: Coefficient de transfert de chaleur à travers la couverture ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

A_{cov} : Surface de la couverture [m^2].

T_{cov} : Température de la couverture [K].

T_{air} : Température de l'air à l'intérieur de la serre [K].

L'équation d'échanges de chaleur par convection entre l'air intérieur de la serre et les conduites de chauffage aura pour expression :

$$Q_{airint, tuy \text{ de } chauff} = \alpha_{tuy \text{ de } chauff} A_{tuy \text{ de } chauff} (T_{tuy \text{ de } chauff} - T_{airint}) \text{ [W]} \quad (\text{III.4})$$

Où :

$\alpha_{tuy \text{ de } chauff}$: Coefficient de transfert de chaleur des tuyaux de chauffage [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$].

$A_{tuy \text{ de } chauff}$: Surface des tuyaux de chauffage [m^2].

$T_{tuy \text{ de } chauff}$: Température de tuyaux chauffants [K].

Pour le flux de chaleur par convection fourni par la ventilation l'équation se présente comme suite :

$$Q_{airint, Vent} = \alpha_{airint, Vent} A_{vent} (T_{air \text{ ext}} - T_{airint}) \text{ [W]} \quad (\text{III.5})$$

Où :

$\alpha_{airint, Vent}$: Coefficient de transfert de chaleur entre l'air à l'intérieur de la serre et son Environnement [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$].

A_{vent} : La surface ventilée [m^2].

$T_{air\ ext}$: Température de l'air extérieur [K].

Le flux de chaleur fourni par le rayonnement solaire est exprimé par la relation simplifiée suivante (Tap, 2000):

$$R_{rayonnementsolaires} = A_s \cdot 0,7 \cdot Rad \text{ [W]} \quad (III.6)$$

Où :

Rad : Est la densité du rayonnement solaire [$W \cdot m^{-2}$].

Il ressort de l'analyse des résultats des études de simulation de la serre que la valeur 0,7 dans cette équation est trop élevée et qu'elle a été ajustée à 0,55.

La détermination des coefficients de transfert thermique α est une tâche complexe, dans cette étude, les coefficients de transfert thermique sont calculés sur la base des modèles d'informations tirées de la littérature (Bot, 1983) et (Zwart, 1996), c'est-à-dire ils ont déterminé expérimentalement une relation entre la différence de température des éléments et la température de l'air dans la serre avec des valeurs caractéristiques.

Ces coefficients sont exprimés par les Formules suivantes :

Pour le coefficient de transfert de chaleur entre l'air et le côté intérieur de la couverture (Zwart, 1996) :

$$\alpha_{cov \rightarrow airint} = 1,7 (\cos\varphi)^{0,33} \cdot (T_{airint} - T_{cov})^{0,25} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (III.7)$$

Où :

φ : Pente ou forme du toit[°].

Pour le coefficient de transfert de chaleur entre l'air et les tuyaux supérieurs de chauffage, situés au-dessus des plantes (Bot, 1983) :

$$\alpha_{airint \rightarrow tuysupdechauf1} = 1,28 A_{tuysupdechauf1}^{-0,25} (T_{tuysupdechauf1} - T_{airint})^{0,25} \quad (III.8)$$

Pour le coefficient de transfert de chaleur entre l'air et les tuyaux de chauffage inférieurs, qui sont situés dans la zone de croissance des plantes (Bot, 1983) :

$$\alpha_{airint \rightarrow tuyinfdechauf2} = 1,28 A_{tuyinfdechauf2}^{-0,25} (T_{tuyinfdechauf2} - T_{airint})^{0,25} \quad (III.9)$$

Pour le coefficient de transfert de chaleur entre l'air intérieur de la serre et ses environs par ventilation naturelle (Kurpaska, 2007):

$$\alpha_{vent} = \rho_{vent} c_{vent} \Phi_{vent} \quad (\text{III.10})$$

Où :

Φ_{vent} : Le débit d'air par l'intermédiaire de ventilateurs [W].

En tenant compte de la densité de la chaleur spécifique de l'air à l'intérieur de la serre, et du débit d'air ventilé. La relation simplifiée est présentée dans le travail de Tap (2000), elle est utilisée dans notre document, pour calculer le débit d'air provoqué par la ventilation :

$$\Phi_{vent} = \left(\frac{\sigma \cdot k_z}{1 + \chi \cdot k_z} + \zeta + \xi \cdot k_n \right) \cdot v_{ext} + \Psi [\text{K s}^{-1}] \quad (\text{III.11})$$

Où :

k_n : Degré d'ouverture des ventilateurs sur le côté du vent [%].

k_z : Degré d'ouverture des ventilateurs sur le côté sous le vent [%].

v_{ext} : La vitesse du vent extérieur [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

$\sigma, \chi, \zeta, \xi, \Psi$: Sont des constantes dont les valeurs qui correspondent respectivement à :

$\sigma = 7.1708 \cdot 10^{-5} (\%^{-1})$, $\chi = 0.0156 (\%^{-1})$, $\zeta = 2.7060 \cdot 10^{-5}$, $\xi = 6.3233 \cdot 10^{-5} (\%^{-1})$,

$\psi = 7.4 \cdot 10^{-5} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$.

Le débit d'air dépend du degré d'ouverture sur le côté du vent k_n , et du degré d'ouverture sur le côté sous le vent k_z , ainsi que sur la vitesse extérieure du vent v_{ext} .

Les deux derniers flux de chaleur Q_{transp} et Q_{cond} sont la chaleur latente, inclus dans le bilan thermique.

Q_{transp} : C'est la chaleur perdue par la transpiration des plantes (phénomène d'évapotranspiration, qui se transforme de l'état liquide en état gazeuse), au cours du métabolisme végétal.

$$Q_{transp} = r_0 A_{fsills} M_{transp} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{III.12})$$

Où :

r_0 : Est la chaleur de vaporisation ou de condensation [J.kg⁻¹].

$A_{feuille}$: Surface feuille de la plante [m²].

M_{transp} : Est le flux massique par m² de surface de la serre absorbé par les plantes pendant la transpiration [kg.m⁻².s⁻¹].

La deuxième source de chaleur latente, est la condensation de vapeur d'eau sur la couverture, qui se libère en vapeur d'eau, dans l'environnement :

$$Q_{cond} = r_0 A_{cov} M_{cond} \text{ [J.kg}^{-1}] \quad (\text{III.13})$$

Où :

M_{cond} : Est le flux de masse provenant de la condensation [kg.m⁻².s⁻¹].

A partir de ce modèle du bilan thermique, chaque variable d'état est défini par une équation (Marco Binotto,2014) :

III.4.2) Variables d'état

A) Couverture

La couverture est simulée avec deux équations différentielles : L'une décrit le côté intérieur et l'autre le côté extérieur. La capacité thermique est également répartie sur les deux faces et le rayonnement solaire absorbé par la paroi est un gain de chaleur seulement du côté intérieur.

La température de la couche extérieure de la couverture est décrite par:

$$\frac{\partial T_{cov,ext}}{\partial t} * (0.5 * cap_{cov}) = Q_{ext \rightarrow cov,ext} - Q_{cov,ext \rightarrow cov,int} - R_{cov,ext \rightarrow ciel} \text{ [W]} \quad (\text{III.14})$$

Où :

cap_{cov} : Est la capacité thermique de la couverture [J K⁻¹].

$Q_{ext \rightarrow cov,ext}$: Est l'échange de chaleur entre l'air extérieur et la face extérieure de la couverture [W].

$Q_{cov,ext \rightarrow cov,int}$: Est la chaleur sensible transférée par conduction d'un côté à l'autre côté de la couverture [W].

$R_{cov,ext \rightarrow ciel}$: Est l'échange thermique de rayonnement infrarouge entre la couverture et le ciel [W].

La température de la couche intérieure de la couverture est décrite par l'équation :

$$\frac{\partial T_{cov.in}}{\partial t} * (0.5 * capcov) = Q_{cov.ext \rightarrow cov.int} + LH * \Phi_{H2O_cond_cov.int} + R_{sunCOV \rightarrow cov} + R_{FIR_{surcov}} - Q_{cov.in \rightarrow airS.Ecr} \quad [W] \quad (III.15)$$

Où :

$capcov$: Est la capacité thermique de la couverture [$J K^{-1}$].

$Q_{cov.ext \rightarrow cov.int}$: Est le transfert de chaleur dû à la conduction du côté extérieur vers le côté intérieur [W].

$LH * \Phi_{H2O_cond_cov.int}$: Est la chaleur latente causée par la condensation sur la couverture de la serre.

$R_{sunCOV \rightarrow cov}$: Est le rayonnement solaire total absorbé par la couverture [W].

$R_{FIR_{surcov}}$: Est la somme de tous les échanges de rayonnements infrarouges qui se produisent au niveau de la couverture [W].

$Q_{cov.int \rightarrow airS.Ecr}$: Est la quantité de chaleur échangée par convection entre la couverture et l'air intérieur de serre au-dessus de l'écran [W].

B) Volume d'air au-dessus de l'écran

La température du volume d'air au-dessus de l'écran est décrite par:

$$\frac{\partial T_{airAS}}{\partial t} * cap_{airCS} = Q_{cov.int \rightarrow airCS} + Q_{air \rightarrow airCS} - Q_{airCS \rightarrow Ecr} - Q_{Ouvert.Toit} \quad [W] \quad (III.16)$$

Où :

cap_{airCS} : Est la capacité thermique de l'air dans le compartiment supérieur [$J K^{-1}$].

$Q_{cov.int \rightarrow airCS}$: Est l'échange de chaleur entre la couverture et l'air [W].

$Q_{air \rightarrow airCS}$: Est l'échange de chaleur entre les deux compartiments dû au flux d'air à travers l'écran [W].

$Q_{airCS \rightarrow Ecr}$: Est l'échange de chaleur de l'air à l'écran [W].

$Q_{Ouvert.Toit}$: Est l'échange thermique dû à l'écoulement d'air à travers les ouvertures du toit [W].

La concentration en vapeur d'eau dans l'air au-dessus de l'écran est décrite par:

$$\frac{\partial C_{H2O_{airS.Ecr}}}{\partial t} * V_{airSECR} = \Phi_{H2O_{air \rightarrow airS.Ecr}} - \Phi_{H2O_{cond_{cov.int}}} - \Phi_{H2O_{cond_{EcrSup}} - \Phi_{H2O_{Ouvert.Toit}} \quad (III.17)$$

Où :

$V_{airS.Ecr}$: Est le volume de l'air au-dessus de l'écran [m³].

$\Phi_{H2O_{air \rightarrow airS.Ecr}}$: Est la quantité d'eau qui migre de l'air vers l'air au-dessus de l'écran dû à l'écoulement d'air à travers l'écran [kg s⁻¹].

$\Phi_{H2O_{cond_{cov.int}}$: Est la vitesse de la condensation de l'eau sur la couverture en [kg s⁻¹].

$\Phi_{H2O_{cond_{EcrSup}}$: Est la vitesse de condensation de l'eau sur la face supérieure de l'écran en [kg s⁻¹].

$\Phi_{H2O_{Ouvert.Toit}}$: Est la quantité d'eau sortant par les ouvertures de toit [kg s⁻¹].

C) Ecran

La température de l'écran est décrite par l'équation :

$$\frac{\partial T_{Scr}}{\partial t} * cap_{Ecr} = Q_{S.Ecr \rightarrow Ecr} + LH * \Phi_{H2O_{cond_{EcrSup}} + LH * \Phi_{H2O_{cond_{EcrInf}} + R_{FIR_{sur_{Ecr}}} + R_{Solaire \rightarrow Ecr} - Q_{Ecr \rightarrow air} - R_{FIR_{sortant_{Ecr}}} \quad (III.18)$$

[W]

Où :

cap_{Ecr} : Est la capacité thermique de l'écran [J K⁻¹].

$Q_{S.Ecr \rightarrow Ecr}$: Est la quantité de chaleur venant de l'air au-dessus de l'écran [W].

$\Phi_{H2O_{cond_{EcrSup}}$ et $\Phi_{H2O_{cond_{EcrInf}}$: Sont la chaleur latente qui se condense de part et d'autre de l'écran [kg s⁻¹].

$R_{FIR_{sur_{Ecr}}$: Est la somme de tous les échanges par rayonnements infrarouges, qui se produisent sur l'écran [W].

$R_{Solaire \rightarrow Ecr}$: Est le rayonnement solaire absorbé par l'écran [W].

$Q_{Ecr \rightarrow air}$: Est l'échange de chaleur entre l'écran et l'air qui est immédiatement en dessous [W].

$R_{FIR_{sortant_{Ecr}}$: Est le débit ou flux de rayonnements infrarouges sortant(FIR) en [W].

D) Air

La température de l'air est décrite par:

$$\frac{\partial T_{air}}{\partial t} * cap_{air} = Q_{Ecr \rightarrow air} + Q_{conv.tuyaux \text{ en croissance} \rightarrow air} + Q_{Syst.Chauff.Inf \rightarrow air} + R_{rayons.LAMP \rightarrow air} + Q_{fuite} + Q_{vent.mécanique} - Q_{air \rightarrow airAS} - Q_{air \rightarrow canopée} - Q_{air \rightarrow sol} - LH * \Phi_{H2O_brouillard}$$

[W] (III.19)

Où :

cap_{air} : Est la capacité thermique de l'air [J K⁻¹].

$Q_{Ecr \rightarrow air}$: Est l'échange de chaleur de l'écran à l'air [W].

$Q_{conv.tuyaux \text{ en croissance} \rightarrow air}$: Est la quantité de chaleur libérée par la convection avec les tuyaux en croissance [W].

$Q_{Syst.Chauff.Inf \rightarrow air}$: Est la chaleur sensible dégagée par le système de chauffage inférieur [W].

$R_{rayons.LAMP \rightarrow air}$: Le terme prend en compte le gain de chaleur sensible dû à la présence des lampes [W].

Q_{fuite} : La quantité de chaleur perdue par les fuites ou déperdition en[W].

$Q_{vent.mécanique}$: Est l'échange thermique dû au système de ventilation mécanique [W].

$Q_{air \rightarrow canopée}$: Est l'échange de chaleur entre l'air et la canopée [W].

$Q_{air \rightarrow sol}$: Est la chaleur échangée entre l'air et le sol [W].

$LH * \Phi_{H2O_brouillard}$: Est la chaleur latente causée par l'évaporation d'eau fournie par le système de brouillard [J.s⁻¹]. Telque : $LH= (2.45*10^6)$ [J.kg⁻¹].

La concentration en vapeur d'eau dans l'air est décrite par:

$$\frac{\partial C_{H2O_air}}{\partial t} * V_{air} = \Phi_{H2O_{vent \text{ mécanique}}} + \Phi_{H2O_brouillard} + \Phi_{H2O_transp_can} - \Phi_{H2O_air \rightarrow airS.Ecr} - \Phi_{H2O_cond_EcrInf}$$

[kg_(H2O) s⁻¹] (III.20)

Où :

V_{air} : Est le volume de l'air [m³].

$\Phi_{H2O_vent\ mécanique}$: Est la quantité d'air entrant ventilée mécaniquement en [kg s⁻¹].

$\Phi_{H2O_brouillard}$: Est la quantité d'eau fournie par le système de brouillard [kg s⁻¹].

$\Phi_{H2O_transp_can}$: Est la quantité d'eau libérée par la transpiration de la canopée [kg s⁻¹].

$\Phi_{H2O_{air \rightarrow airS.Ecr}}$: Est la quantité d'eau qui migre de l'air inférieur vers l'air au-dessus de l'écran [kg s⁻¹].

$\Phi_{H2O_cond_EcrInf}$: Est la vitesse de la condensation de l'eau sur le côté inférieur de l'écran [kg s⁻¹].

E) Canopée

La température de la canopée est décrite par :

$$\frac{\partial T_{can}}{\partial t} * cap_{can} = Q_{air \rightarrow can} + R_{FIR_sur_can} + R_{Solaire \rightarrow can} - R_{FIR_sortant_can} - LH * \Phi_{H2O_evap_can} \quad [W] \quad (III.21)$$

Où :

cap_{can} : Est la capacité thermique de la canopée [W].

$Q_{air \rightarrow can}$: Est l'échange de la chaleur entre l'air et la canopée [W].

$R_{FIR_sur_can}$: Est la somme de tous les échanges thermiques avec la canopée [W].

$R_{Solaire \rightarrow can}$: Est le rayonnement solaire absorbé par la canopée [W].

$R_{FIR_sortant_can}$: Est le rayonnement thermique sortant de la canopée [W].

$LH * \Phi_{H2O_evap_can}$: Est la chaleur latente causée par l'évaporation de la canopée [J.s⁻¹].

F) Sol

La température du sol intérieur et sa première couche qui suit est décrite par l'équation suivante :

$$\frac{\partial T_{sol}}{\partial t} * cap_{sol} = Q_{air \rightarrow sol} + R_{Solaire \rightarrow sol} + R_{FIR_entrant_sol} - Q_{sol \rightarrow sol} - R_{FIR_sortant_sol} [W] \quad (III.22)$$

Où :

cap_{sol} : Est la capacité thermique du sol [J K⁻¹].

$Q_{\text{air} \rightarrow \text{sol}}$: Est le flux de chaleur échangé entre l'air et le sol [W].

$R_{\text{Solaire} \rightarrow \text{sol}}$: Représente le rayonnement solaire absorbé par le sol [W].

$R_{\text{FIR}_{\text{entrant}}_{\text{sol}}}$: Est le rayonnement thermique (infrarouge) absorbé par le sol [W].

$Q_{\text{sol} \rightarrow \text{sous sol}}$: Est le flux de chaleur par conduction de la surface du sol et sa couche qui suit [W].

$R_{\text{FIR}_{\text{sortant}}_{\text{sous sol}}}$: Est le rayonnement thermique sortant [W].

G) Couches du sol

Le sol est divisé en cinq couches avec une épaisseur croissante, La température du sol $T_{\text{sol } j}$, de la couche j est décrite par :

$$\frac{\partial T_{\text{sol } j}}{\partial t} * \text{cap}_{\text{sol } j} = Q_{\text{sol } j-1 \rightarrow \text{sol } j} - Q_{\text{sol } j \rightarrow \text{sol } j+1} \quad j=1,2,\dots,5. [\text{W}] \quad (\text{III.23})$$

Où :

$\text{cap}_{\text{sol } j}$: Est la capacité thermique de chaque couche de sol [J K^{-1}].

$Q_{\text{sol } j-1 \rightarrow \text{sol } j}$: Est le flux de chaleur par conduction à travers la couche $j-1$ et la couche j en [W].

$Q_{\text{sol } j \rightarrow \text{sol } j+1}$: Est l'échange thermique de la couche j à la couche $j+1$ [W].

H) Les tuyaux en croissance

La température des tubes en croissance est décrite par l'équation suivante:

$$\frac{\partial T_{\text{tuyaux}}}{\partial t} * \text{cap}_{\text{tuyaux}} = Q_{\text{fournie}_{\text{tuyaux}}} - Q_{\text{tuyaux} \rightarrow \text{air}} - Q_{\text{FIR}_{\text{sortant}}_{\text{tuyaux}}} [\text{W}] \quad (\text{III.24})$$

Où :

$\text{cap}_{\text{tuyaux}}$: Est la capacité thermique des tuyaux [J K^{-1}].

$Q_{\text{fournie}_{\text{tuyaux}}}$: Est la puissance fournie et échangée avec les tuyaux [W].

$Q_{\text{tuyaux} \rightarrow \text{air}}$: Est la chaleur sensible échangée entre l'air et les tuyaux [W].

$Q_{\text{FIR}_{\text{sortant}}_{\text{tuyaux}}}$: Est le rayonnement thermique libéré par les tuyaux [W].

I) Tuyaux inférieures du système de chauffage

L'équation de la température des conduites inférieures du système de chauffage est décrite par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{\text{tuyaux.inf.ch}}}{\partial t} * \text{cap}_{\text{tuyaux.inf.ch}} \\ = Q_{\text{solaire} \rightarrow \text{tuyaux.inf.ch}} + Q_{\text{fournie_tuyaux.inf.ch}} - Q_{\text{tuyaux.inf.ch} \rightarrow \text{air}} \\ - R_{\text{FIR_sortant_tuyaux.inf.ch}} \end{aligned} \quad (\text{III. 25})$$

Où :

$\text{cap}_{\text{tuyaux.inf.ch}}$: Est la capacité thermique des tuyaux [J K^{-1}].

$Q_{\text{solaire} \rightarrow \text{tuyaux.inf.ch}}$: Est le flux de rayonnements solaire absorbé par les tuyaux [W].

$Q_{\text{fournie_tuyaux.inf.ch}}$: Est la puissance d'énergie fournie par le système de chauffage [W].

$Q_{\text{tuyaux.inf.ch} \rightarrow \text{air}}$: Est la chaleur échangée entre les tuyaux du serpentin inférieur et l'air en [W].

$R_{\text{FIR_sortant_tuyaux.inf.ch}}$: Est le rayonnement thermique sortant des tuyaux en [W].

III.4.3) Modèle de radiation solaire

Les rayonnements absorbés, réfléchis et transmis de toute la surface dépendent de leurs longueurs d'onde. Dans notre modèle le rayonnement solaire de chaque surface est partagée en PAR, NIR et FIR.

Selon (Papadakis, et al), le rayonnement solaire global sur un plan horizontal est estimé aux taux suivants: 40% PAR, 39% NIR, 21% FIR.

La figure (III.2) montre le modèle pour chaque surface. Chaque élément est décrit par des coefficients prédéfinis : l'absorption (α), la réflexion (ρ) et la transmission (τ), pour chaque intervalle de longueur d'onde. Chaque surface est modélisée avec deux flux de rayonnement entrants: un du haut et l'autre du bas (Binotto, 2014).

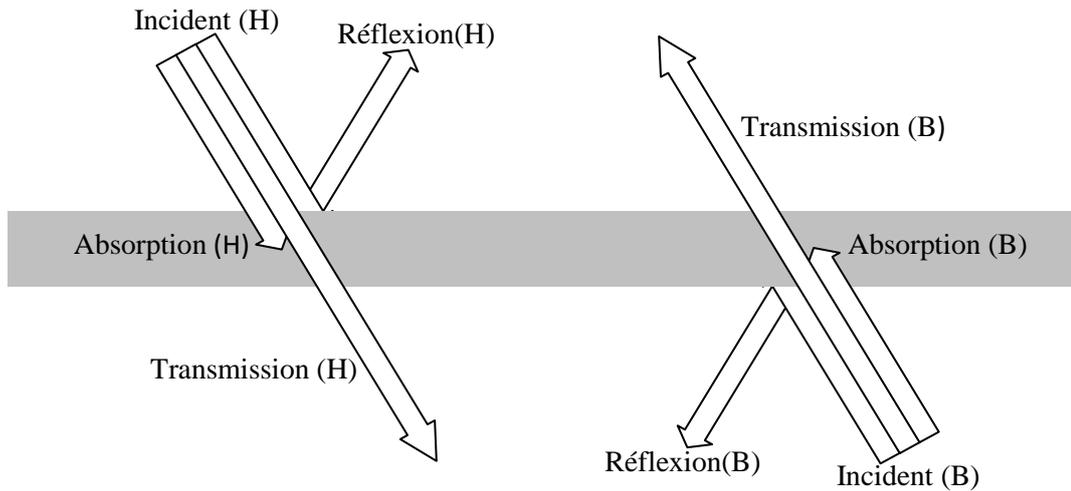


Figure (III.2) : Idée de base de la modélisation de chaque surface

Le rayonnement incident est divisé en trois courants unidimensionnels selon les relations suivantes:

$$\text{Absorption} = \alpha * \text{Incident}$$

$$\text{Réflexion} = \rho * \text{Incident}$$

$$\text{Transmission} = \tau * U_{Ecr}$$

Pour modéliser la surface discontinue (tuyaux et lampes), une partie du rayonnement incident est directement additionnée à celle transmise.

Cette quantité de rayonnement qui contourne le modèle de surface de base est calculée en utilisant des ratios de surface. Plus une autre méthode similaire qui pourrait être utilisée, quand l'écran est totalement (ou partiellement) ouvert. Les propriétés optiques sont modifiées selon les équations suivantes, où $U_{Ecr} \{0-1\}$ est la variable de contrôle pour le taux de fermeture de l'écran.

$$\text{Absorption} = (U_{Ecr} * \alpha) * \text{Incident} = \alpha_U * \text{Incident} [W]$$

$$\text{Réflexion} = (U_{Ecr} * \rho) * \text{Incident} = \rho_U * \text{Incident} [W]$$

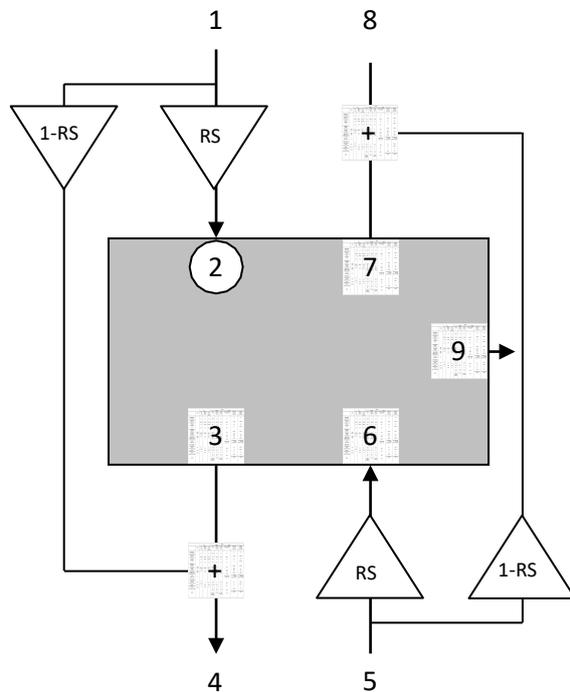
$$\text{Transmission} = [1 - U_{Ecr} * (1 - \tau)] * \text{Incident} = \tau_U * \text{Incident} [W]$$

$$\text{Transmission} = [1 - U_{Ecr} * (1 - \tau)] * \text{Incident} = \tau_U * \text{Incident} [W]$$

Equations (III. 26)

Cette méthode permet de définir le coefficient de transmission τ_U en fonction du taux de fermeture de l'écran, utile pour calculer les facteurs de vue en fonction des flux infrarouges FIR.

Une représentation graphique de ce qu'on a dit, est donnée sur la figure(III.3) , Les cases grises représentent les mêmes relations montrées dans la figure (III.2) avec les mêmes notations :



Où :

RS=Rapport de la surface

2=RS *Incident (H)

3=Transmission (H)+Réflexion (B)

6=RS *Incident (B)

7=Transmission (B)+Réflexion (H)

9=Absorption (H)+Absorption (B)

Figure (III.3) : Bloc pour modéliser chaque surface

III.4.4) Modèle de rayonnement infrarouge

Le rayonnement infrarouge net de la surface de l'objet i à j est décrit par :

$$R_{FIR,i \rightarrow j} = A_i \epsilon_i \epsilon_j F_{i \rightarrow j} \sigma [(T_i + 273,15)^4 - (T_j + 273,15)^4] \text{ [W]} \quad (III.27)$$

Où:

A_i [m²] : Est la surface de l'objet i .

(ϵ_i, ϵ_j) [-] : Sont les coefficients thermique d'émissions infrarouges respectives des objets i et j .

$F_{i \rightarrow j}$ [-]: Est le facteur de vue de la surface i sur j .

σ [W m⁻² K⁻⁴] : Est la constante de Stefan Boltzmann.

T_i [°C] et T_j [°C] : Sont les températures respectives des objets i et j .

Pour simplifier la gestion des entrées et des sorties des différentes surfaces, tous les flux de FIR sont additionnés selon les équations suivantes:

A) Couverture

La FIR sortante est décrite par:

$$R_{\text{FIR}_{\text{cov.sortante} \rightarrow \text{ciel}}} = A_{\text{cov}} * \varepsilon_{\text{FIR}_{\text{cov}}} * [(T_{\text{cov}} + 273,15)^4 - (T_{\text{ciel}} + 273,15)^4] \quad (\text{III.28})$$

La FIR entrante est décrite par:

$$\begin{aligned} R_{\text{FIR}_{\text{entrante}_{\text{cov}}}} &= R_{\text{FIR}_{\text{tuyaux.inf.ch} \rightarrow \text{cov}}} + R_{\text{FIR}_{\text{Ecr} \rightarrow \text{cov}}} + R_{\text{FIR}_{\text{can} \rightarrow \text{cov.in}}} \\ &+ R_{\text{FIR}_{\text{Sol} \rightarrow \text{cov}}} \quad (\text{III.29}) \end{aligned}$$

B) Écran

La FIR sortante est décrite par:

$$R_{\text{FIR}_{\text{sortante}_{\text{Ecr}}} = R_{\text{FIR}_{\text{Ecr} \rightarrow \text{ciel}}} + R_{\text{FIR}_{\text{Ecr} \rightarrow \text{cov}}} \quad (\text{III.30})$$

La FIR entrante est décrite par:

$$R_{\text{FIR}_{\text{entrante}_{\text{Ecr}}} = R_{\text{FIR}_{\text{can} \rightarrow \text{Ecr}}} + R_{\text{FIR}_{\text{tuyaux.inf.ch} \rightarrow \text{Ecr}}} + R_{\text{FIR}_{\text{Sol} \rightarrow \text{Ecr}}} \quad (\text{III.31})$$

C) Canopée

La FIR sortante est décrite par:

$$R_{\text{FIR}_{\text{sortante}_{\text{can}}} = R_{\text{FIR}_{\text{can} \rightarrow \text{ciel}}} + R_{\text{FIR}_{\text{can} \rightarrow \text{cov}}} + R_{\text{FIR}_{\text{can} \rightarrow \text{Ecr}}} + R_{\text{FIR}_{\text{can} \rightarrow \text{Sol}}} \quad (\text{III.32})$$

La FIR entrante est décrite par:

$$R_{\text{FIR}_{\text{entrante}_{\text{can}}} = R_{\text{FIR}_{\text{tuyaux.inf.ch} \rightarrow \text{can}}} + R_{\text{FIR}_{\text{tuyaux.en.croissance}}} \quad (\text{III.33})$$

D) Sol

La FIR sortante est décrite par:

$$R_{\text{FIR}_{\text{sortante}_{\text{sol}}} = R_{\text{FIR}_{\text{sol} \rightarrow \text{ciel}}} + R_{\text{FIR}_{\text{sol} \rightarrow \text{cov}}} + R_{\text{FIR}_{\text{sol} \rightarrow \text{Ecr}}} \quad (\text{III.34})$$

La FIR entrante est décrite par:

$$R_{\text{FIR}_{\text{entrante}_{\text{sol}}} = R_{\text{FIR}_{\text{tuyaux.inf.ch} \rightarrow \text{sol}}} + R_{\text{FIR}_{\text{can}_{\text{sol}}}} \quad (\text{III.35})$$

E) Les tuyaux en croissance

La FIR sortante est décrite par:

$$R_{FIR_sortante_tuyaux.en.croissance} = A_{tuyaux.en.croissance} * \varepsilon_{FIRtuyaux.en.croissance} * \varepsilon_{FIRcan} * [(T_{tuyaux.en.croissance} + 273,15)^4 - (T_{can} + 273,15)^4]$$

(III.36)

F) Tuyaux inférieures du système de chauffage

La FIR sortante est décrite par:

$$R_{FIR_sortante_tuyaux.inf.ch} = R_{FIR_tuyaux.inf.ch \rightarrow ciel} + R_{FIR_tuyaux.inf.ch \rightarrow cov} + R_{FIR_tuyaux.inf.ch \rightarrow Ecr} + R_{FIR_tuyaux.inf.ch \rightarrow can} + R_{FIR_tuyaux.inf.ch \rightarrow sol}$$

(III.37)

III.4.5) Modèle du bilan massique de la serre

La teneur en vapeur d'eau de l'air intérieur de la serre, est un paramètre environnemental très important qui détermine le bon développement d'une culture. Il est également utilisé pour évaluer le risque de maladies et de développement indésirable des ravageurs.

Le modèle qui décrit les changements de la teneur en vapeur d'eau de l'air à l'intérieur de la serre est défini dans l'équation du bilan de masse.

La première source de vapeur d'eau est due à la transpiration de la plante. La vapeur d'eau dans l'air intérieur de la serre est réduite par la condensation sur la face intérieure de la couverture. Le transfert de masse dû à la ventilation est fonction des conditions à l'intérieur et à l'extérieur de la serre.

L'équation du bilan massique prend la forme suivante :

$$\frac{V_{serre}}{A_{serre}} \frac{df_{int}}{dt} = M_{ransp} - M_{cond} - M_{vent}$$

(III.38)

Où :

V_{serre} : Volume de la serre (m³).

A_{serre} : Surface de la serre (m²).

f_{int} : La teneur en eau de l'air à l'intérieur de la serre [g.m⁻³].

M_{vent} : Flux massique dû à la ventilation [kg.m⁻².s⁻¹].

Pour déterminer la transpiration des plantes M_{transp} , On a appliqué un modèle de régression présenté dans le travail (Kurpaska, 2006) , en tenant compte des facteurs contrôlables du climat environnant, à savoir le rayonnement solaire R , la température de l'air à l'intérieur de la serre T_{airint} et la déficience en pression de vapeur VPD :

$$M_{transp} = \frac{1}{120} (0,0025.R + 0,098 T_{airint} - 0,143 .VPD + 0,05) [\text{g. m}^{-2} . \text{s}] \quad (\text{III.39})$$

Où :

VPD : Déficit de la pression de vapeur [Pa].

La température du côté intérieur de la couverture est calculée selon l'équation suivante (Kurpaska, 2007) :

$$T_{cov} = 0,4 T_{ext} + 0,6 T_{int} \quad [\text{K}]$$

Où :

T_{cov} : Température de couverture [K].

T_{ext}, T_{int} : La température du côté extérieur et intérieur de couverture [K].

La condensation de la vapeur d'eau sur le côté intérieur de la couverture est exprimée par La relation de (Tap, 2000) :

$$\begin{cases} M_{cond} = m_1 |T_{ext} - T_{cov}|^{m_2} (f_{int} - f_{intmax}) & \text{lorsque } f_{int} > f_{intmax} \\ M_{cond} = 0 & \text{lorsque } f_{int} \leq f_{intmax} \end{cases} [\text{g.m}^{-2} . \text{s}] \quad (\text{III.40})$$

Où :

$m_1 |T_{ext} - T_{cov}|^{m_2}$: Coefficient de transfert de masse.

m_1 et m_2 : Des paramètres fixes du coefficient de transfert de masse.

f_{intmax} : La teneur maximale en eau de l'air à l'intérieur de la serre [g.m^{-3}].

La réduction ou l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'air à l'intérieur de la serre est également réalisée par la ventilation. La quantité de vapeur d'eau éliminée de la serre est décrite par la relation suivante :

$$M_{vent} = \Phi_{vent} (f_{int} - f_{ext}) [\text{g. m}^{-2} . \text{s}] \quad (\text{III.41})$$

Où :

f_{ext} : La teneur en eau de l'air extérieur [g.m^{-3}].

Le débit d'air à travers les ventilateurs est calculé à partir de la relation présentée dans la partie du bilan thermique.

III.4.6) Modélisation des systèmes serre

A) Systèmes de chauffage

Le système de chauffage modélisé se compose de deux tuyaux de chauffage indépendants: l'un placé sous la canopée (tuyaux inférieurs) et l'autre dans la canopée (tuyaux supérieurs) (T. Boulard, S. Wong 2002).

a) Tuyaux en croissance

Les tuyaux en croissance sont placés entre les rangées des cultures. En raison de leurs proximités avec les feuillages des plantes, ils ne peuvent avoir de températures élevées pour ne pas stresser la culture, leur gestion doit être soigneusement suivie. Les tuyaux en croissance doivent fonctionner dans une plage de température de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dans ce modèle, le système de commande est choisi pour assurer une température constante des tuyaux de $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$Q_{fournis_tuyaux\ en\ croissance} = A_{soul} * \begin{cases} 100 & \text{si } T_{tuyaux} < 27,5\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0 & \text{si } T_{tuyaux} > 27,5\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} [\text{W}] \quad (\text{III.42})$$

b) Système de chauffage inférieur

Le système de chauffage situé sous la canopée ; dont les tuyaux sont installés sous les bancs et sur les côtés des sentiers de marche doivent être dimensionnés correctement, pour contribuer efficacement au climat interne de la serre.

En raison de l'importance de ce système de chauffage, il a été modélisé avec un contrôleur proportionnel décrit par:

$$Q_{fournis_tuyaux} = A_{sol} * \left\| K_{p_tuyaux} * (T_{ref} - T_{air}) \right\|_0^{250} \quad (\text{III.43})$$

Où :

$Q_{fournis_tuyaux}$: est la puissance thermique entrant dans les tuyaux [W]..

$K_{p_tuyaux} = 125\text{ [W K}^{-1}\text{ m}^{-2}]$: Est la constante de proportionnalité.

A_{sol} : est la surface de sol de la serre [m^2].

T_{air} [° C] : Est le paramètre contrôlé et T_{ref} [° C] est la valeur désirée de la variable contrôlée.

Le terme entre parenthèses $\| \cdot \|_0^{250}$ est limitée à une valeur comprise entre zéro et 250 [W m⁻²] , Cette limitation se fait à l'aide du bloc "Saturation Simulink®" qui indique la puissance maximale et minimale, que le générateur peut fournir par mètre carré.

La température désirée T_{ref} est de 20 ° C pendant la période de jour et de 18 ° C pendant la période de nuit.

B) Systèmes de refroidissement

Selon (Heuvelink, 2005), il existe trois méthodes communes pour le refroidissement des serres: (1) ventilation naturelle (2) ventilation mécanique (3) refroidissement par le brouillard (brumisation).

La serre étudiée est équipée d'une ouverture sur le toit, des ventilateurs qui soufflent l'air extérieur mélangé avec du CO₂ provenant d'une source externe et un système de brouillard.

a) Ventilation naturelle

Le taux d'ouverture des ouvrants de toiture de la serre, est contrôlé en permanence pour laisser entrer le débit de l'air frais, La stratégie du contrôle adoptée est un contrôleur proportionnel qui est décrit par :

$$U_{\text{ouverture du toit}} = \| K_{p_{\text{ouverture du toit}}} * (T_{ref} - T_{air}) \|_0^1 \quad (\text{III.44})$$

Où :

$U_{\text{ouverture du toit}}$: Est le signal de sortie du contrôleur

$K_{p_{\text{ouverture du toit}}} = 0.5$ [K⁻¹] : Est la constante de proportionnalité.

T_{ref} [° C] : Est la valeur désirée de la variable contrôlée et T_{air} [° C] qui est le paramètre contrôlé.

Le terme entre parenthèses $\| \cdot \|_0^1$ est limité à une valeur supérieure égale à 1 [-] et une valeur inférieure égale à zéro. Cette limitation se fait en utilisant le bloc "Saturation Simulink" qui indique le taux d'ouverture maximale et minimale des ouvrants du toit.

La température désirée T_{ref} est de 20 ° C pendant la période diurne et de 18 ° C pendant la période nocturne.

b) Ventilation mécanique

Le système de ventilation mécanique fournit de l'air frais mélangé au dioxyde de carbone provenant d'une source externe. En raison des coûts d'électricité associés, la ventilation naturelle est utilisée pour abaisser la température intérieure, et la mécanique est configurée pour assurer un flux d'air minimum qui permet une distribution efficace de CO₂ et d'augmenter l'afflux d'air frais si l'humidité est trop élevée.

Le système de commande choisi est décrit par:

$$Q_{ouverture} = A_{sol} * 1 * 10^{-3} + A_{sol} \left\| K_{p_{ouverture}} (C_{H_2O_{air}} - C_{H_2O_{ref}}) \right\|_0^{1*10^{-3}} \quad (III.45)$$

Où :

$Q_{ouverture}$: Est le flux d'air par l'ouverture [W].

A_{sol} : Est la surface de sol de la serre [m²].

$1*10^{-3}$ [m³_{air} s⁻¹ m⁻²_{plancher}] : Est le débit d'air minimum.

$K_{p_{ouverture}} = 0,5$ [m⁴ s⁻¹ kg⁻¹] : Est la constante de proportionnalité.

$C_{H_2O_{air}}$ [Kg m⁻³] : Est la concentration en vapeur d'eau dans l'air. Et $C_{H_2O_{ref}}$ [kg m⁻³], est l'humidité désirée.

Le terme entre parenthèses $\left\| \right\|_0^{1*10^{-3}}$ est limité entre zéro et $1 * 10^{-3}$ [m³ s⁻¹ m⁻²].

Cette limitation s'effectue à l'aide du bloc "Saturation Simulink®" qui indique le débit d'air maximum et minimum autorisé pour réduire l'humidité de l'air.

C) Système de brouillard

Le système de brumisation est utilisé principalement pour assurer un taux d'humidification relative d'environ 80% et non pour abaisser la température.

Le système de contrôle du brouillard est décrit par:

$$Q_{H_2O_{brouillard}} = A_{sol} \left\| K_{p_{brouillard}} (C_{H_2O_{ref}} - C_{H_2O_{air}}) \right\|_0^{20*10^{-6}} \quad [Kg \text{ s}^{-1}] \quad (III.46)$$

Où :

$Q_{H_2O_{brouillard}}$: Est le débit d'eau fourni sous forme de brouillard dans la serre [kg s⁻¹].

A_{sol} [m²] : Est la surface du sol de la serre.

$K_{p_{brouillard}} = 1$ [m s⁻¹] : Est la constante de proportionnalité.

$C_{H_2O_{air}}$ [Kg m⁻³] : Est la concentration en vapeur d'eau dans l'air. Et $C_{H_2O_{ref}}$ est l'humidité de consigne calculée sur la base d'une humidité relative à 80% :

La concentration en vapeur d'eau est calculée en utilisant la loi pour le gaz idéal :

$$C_{H_2O_i} = \frac{VP_i * MM_{H_2O}}{R * (T + 273,15)} \text{ [kg m}^{-3}\text{]} \quad (III.47)$$

Où :

VP_i : Est la pression de vapeur d'eau de la zone i [Pa].

$MM_{H_2O} = 18 * 10^{-3}$ [kg mol⁻¹] : Est la masse molaire d'eau.

$R = 8.314$ [J mol⁻¹ K⁻¹] : Est la constante de gaz idéale.

T [°C] : Est la température à laquelle on a calculé VP_i .

La pression de vapeur d'eau VP_i est décrite par :

$$VP_i = VP_{sat} * \frac{C_{H_2O_i}}{C_{H_2O_{sat,i}}} \text{ [Pa]} \quad (III.48)$$

Où :

VP_{sat} [Pa] : Est la pression de saturation en vapeur d'eau à la température.

La pression de saturation en vapeur d'eau VP_{sat} à la température T [° C], est calculée par:

$$VP_{sat} = A * e^{\frac{B * T}{C + T}} \text{ [Pa]} \quad (III.49)$$

Où les constantes A, B, C prennent des valeurs selon les conditions suivantes :

$$si T \geq 0 \text{ } ^\circ C \begin{cases} A = 610,780 \\ B = 17,08085 \\ C = 234,175 \end{cases} \quad si T \leq 0 \text{ } ^\circ C \begin{cases} A = 610,414 \\ B = 22,44294 \\ C = 272,440 \end{cases}$$

Les termes $C_{H_2O_i}$ et $C_{H_2O_{sat,i}}$ [kg {H₂O} m⁻³] , sont respectivement la concentration de vapeur d'eau demandée et la concentration de saturation.

L'humidité relative est définie alors comme suit :

$$HR = 100 * \frac{VP_i}{VP_{sat,i}} \text{ [%]} \quad (III.50)$$

A partir de cette relation, la concentration de la vapeur d'eau extérieure et l'humidité relative à l'intérieur sont définis.

Le terme entre parenthèses $\| \left\|_0^{20 \cdot 10^{-6}}\right\|$ est limité entre zéro et $20 \cdot 10^{-6} [\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}]$.

Cette limitation s'effectue à l'aide du bloc "Saturation Simulink®" et indique le débit d'eau minimum et maximum.

III.4.7) Organisation du modèle

Notre modèle a été développé en utilisant une forme d'organisation selon le modèle proposé par (Jamisson M.Hill, 2006). Le modèle de la plante utilisé était paramétré pour les semis de douglas, Les plantes ont été commencées à 0,57 g de poids sec, et récoltées à 1,67 g de poids sec; une nouvelle saison de croissance a été enregistrée à chaque récolte.

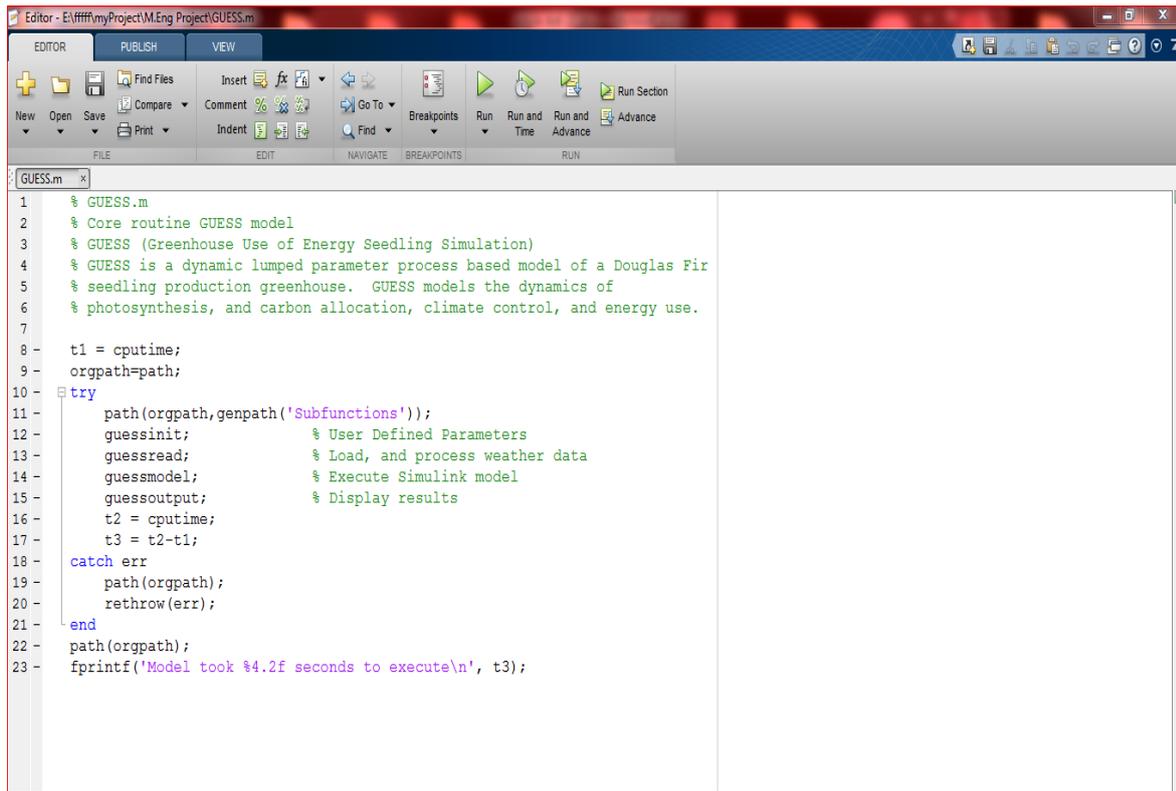
Alors après qu'on a obtenu une liste complète des équations qui peut montrer les relations entre les quantités, elle ne m'indique pas sur la façon dont ces équations doivent être résolues numériquement sur l'ordinateur. Et encore moins, comment ils doivent être exprimés et organisés comme une partie du logiciel de modèle global. Les équations mathématiques doivent être traduites en code informatique, Qui, lors de la compilation et de l'exécution, il traduit les données d'entrée brutes en données significatives.

Dans notre modèle, chaque bloc est défini par trois groupes d'ensembles de variables: les entrées, les variables d'état qui décrivent l'état du comportement et la sortie qui dépendent directement de cet état. A chaque pas de temps, le bloc peut être appelé à exécuter les commandes suivantes:

1. Initialisation / réinitialisation des sorties et des états.
2. Calcul des dérivés d'état.
3. Intégrer les dérivés d'état pour calculer le prochain état.
4. Calcule des sorties en fonction de l'état actuel.

Cette méthodologie est robuste et simple et elle peut être appliquée à un large éventail de procédés, en particulier ceux qui impliquent des paramètres pondérés (bilan de masses / d'énergie) ou les fonctions de transfert, elle est donc très sensible aux modèles de culture. L'impulsion principale pour l'utilisation de Simulink est que cette méthodologie est intégrée dans la structure du programme, ce qui permet à l'utilisateur de se concentrer sur le côté du diagramme du modèle.

```
% GUESS.m
% Core routine GUESS model
% GUESS (Greenhouse Use of Energy Seedling Simulation)
% GUESS is a dynamic lumped parameter process based model of a Douglas Fir
% seedling production greenhouse. GUESS models the dynamics of
% photosynthesis, and carbon allocation, climate control, and energy use.
t1 = cputime;
orgpath=path;
try
path(orgpath,genpath('Subfunctions'));
guessinit;          % User Defined Parameters
guessread;          % Load, and process weather data
guessmodel;         % Execute Simulink model
guessoutput;        % Display results
t2 = cputime;
    t3 = t2-t1;
catch err
path(orgpath);
rethrow(err);
end
path(orgpath);
fprintf('Model took %4.2f seconds to execute\n', t3);
```



```

1  % GUESS.m
2  % Core routine GUESS model
3  % GUESS (Greenhouse Use of Energy Seedling Simulation)
4  % GUESS is a dynamic lumped parameter process based model of a Douglas Fir
5  % seedling production greenhouse. GUESS models the dynamics of
6  % photosynthesis, and carbon allocation, climate control, and energy use.
7
8  t1 = cputime;
9  orgpath=path;
10
11 try
12     path(orgpath,genpath('Subfunctions'));
13     guessinit;           % User Defined Parameters
14     guessread;          % Load, and process weather data
15     guessmodel;        % Execute Simulink model
16     guessoutput;       % Display results
17     t2 = cputime;
18     t3 = t2-t1;
19 catch err
20     path(orgpath);
21     rethrow(err);
22 end
23 path(orgpath);
24 fprintf('Model took %4.2f seconds to execute\n', t3);

```

Figure (III.4) : Code d'organisation pour notre modèle

III.4.8) Simulation et validation du modèle

Un ensemble de données horaires ,allant du 1janvier au 31 décembre 2015, ont été saisis pour deux régions différentes à la station météorologique ,la première concerne une zone humide de Dar El-Beida Algérie ,et la deuxième , une zone aride de Biskra Algérie,qui ont été exploitées pour simuler et valider notre modèle .Les deux bases de données météorologiques ,sont sous forme d'un fichier CSV, qui se compose de quatre colonnes comportant le rayonnement solaire global, la température, l'humidité et la vitesse du vent.

Pour la validation du notre modèle on a utilisé la version complète de Windows de MATLAB Simulink R2012b (8.0.0.783) ,64bit (win64). La simulation a été effectuée sur un ordinateur portable TOSHIBA. Ce dernier est équipé d'un disque dur 700 Go, et 5 Go de RAM. Les parties Simulink du modèle ont été effectués en mode "Accelerator "qui a d'abord généré une représentation compacte de code C du diagramme, puis compilé et exécuté. Les schémas Simulink obtenus sont sous la forme d'un sous modèle intégré dans des blocs, décomposant ainsi le modèle global. Notre modèle est validé d'une façon indépendante. Les schémas Simulink résultants de l'implémentation et de la validation de notre modèle de serre et ses systèmes (chauffage, ventilation, refroidissement et brumisation etc.), sont représentés dans les figures ci après.

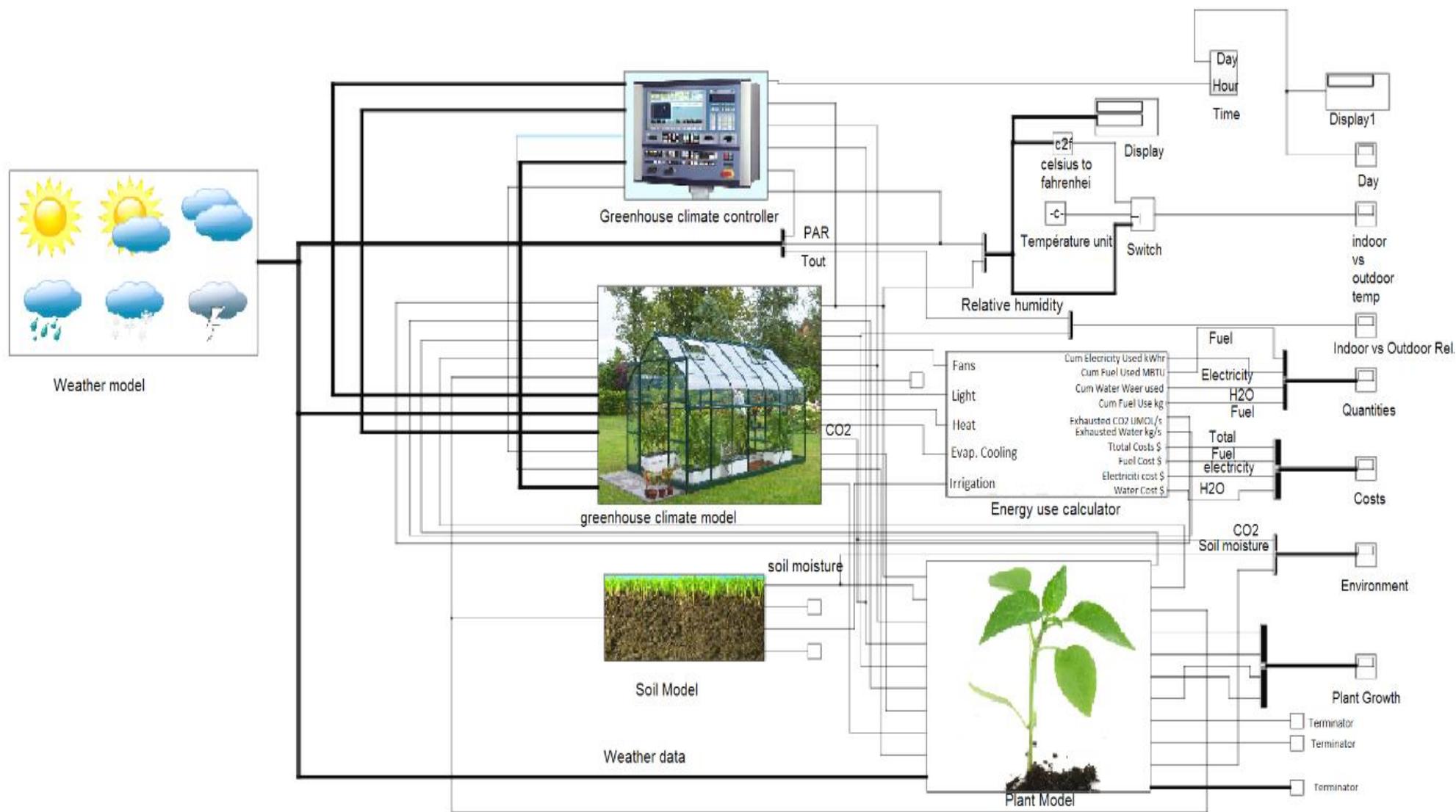


Figure (III.5) :Schéma Simulink représente notre modèle global de la serre

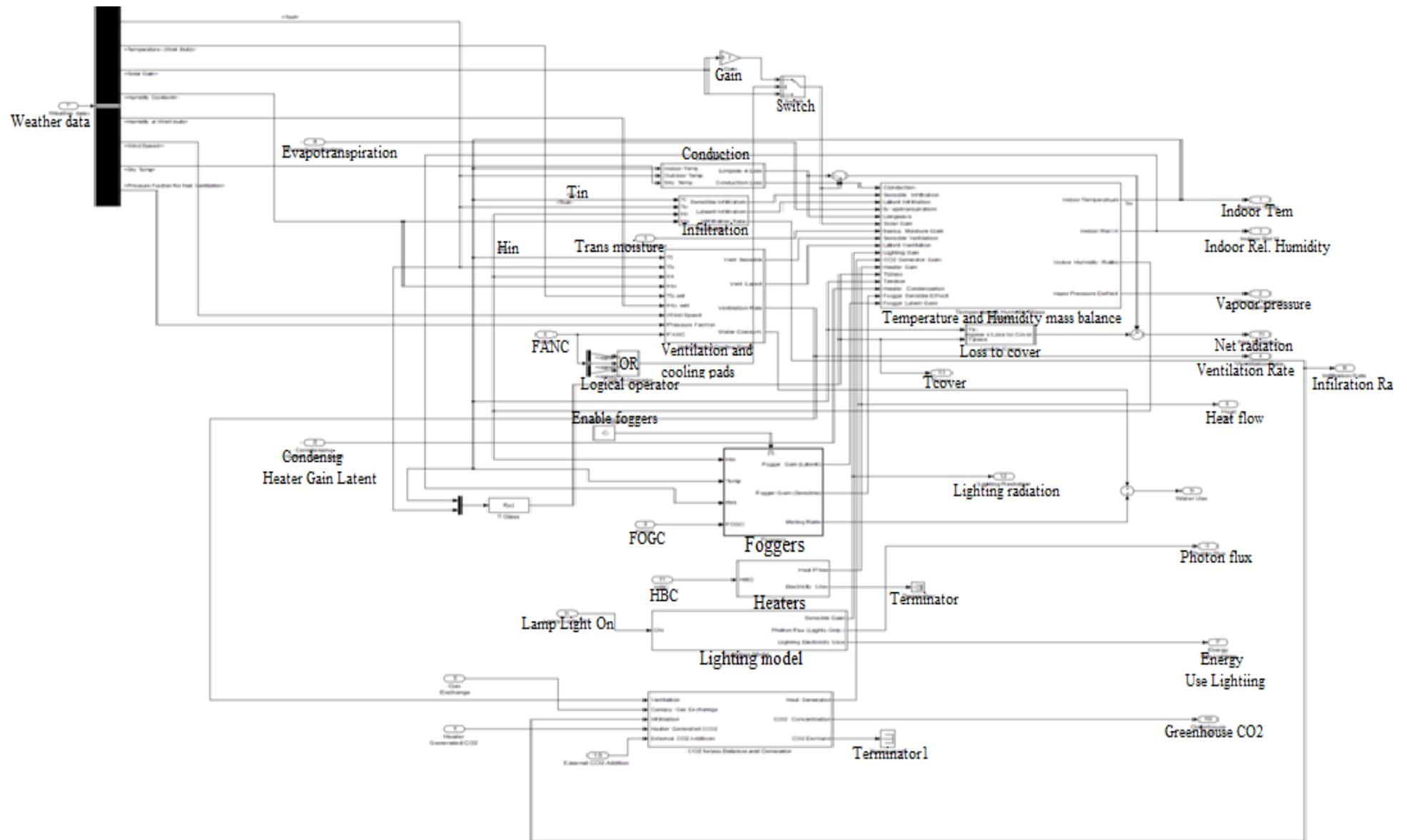


Figure (III.6) : Représentation Simulink du modèle de micro climat de la serre

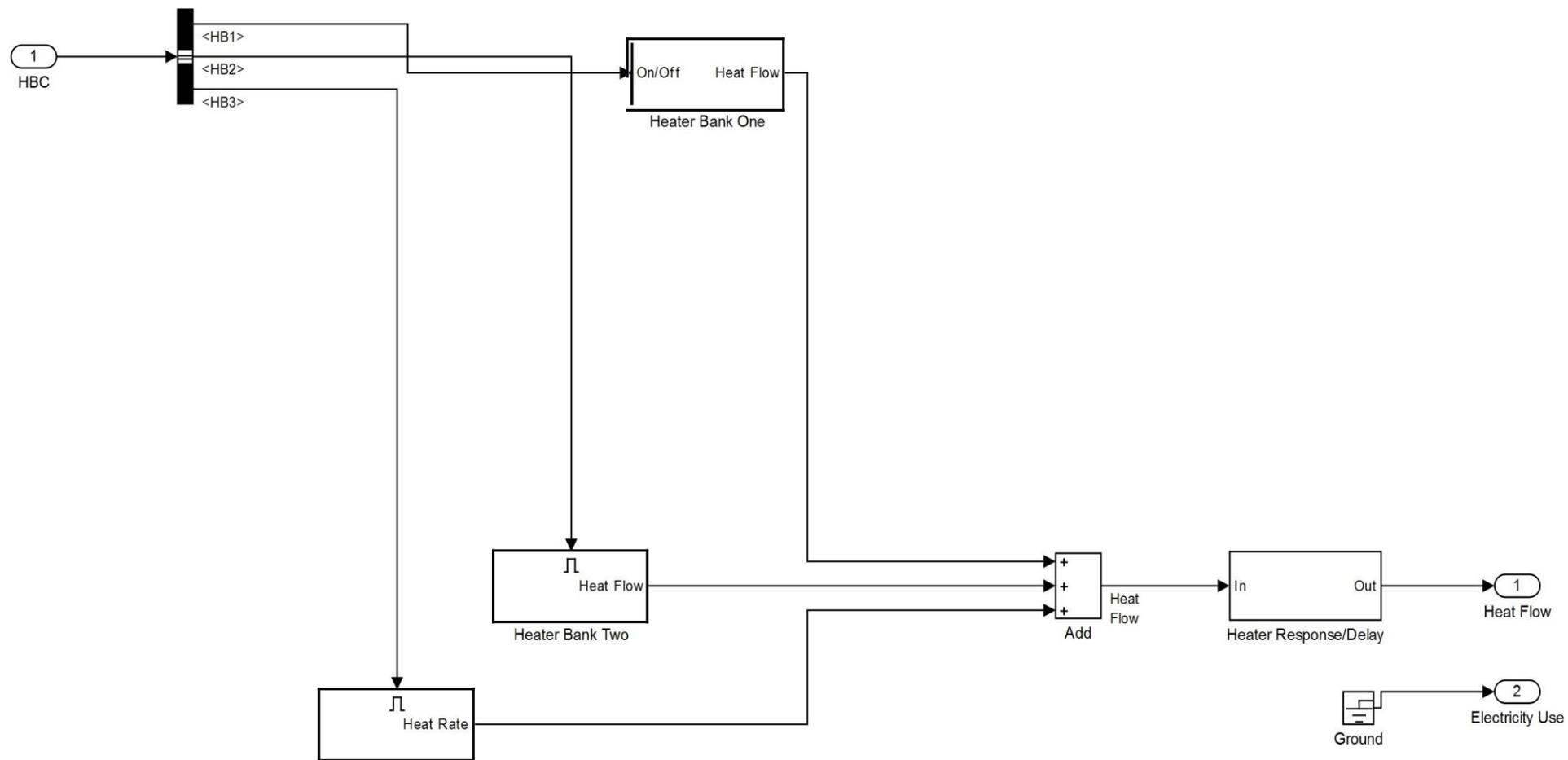


Figure (III.7) : Représentation Simulink du modèle des systèmes de chauffage

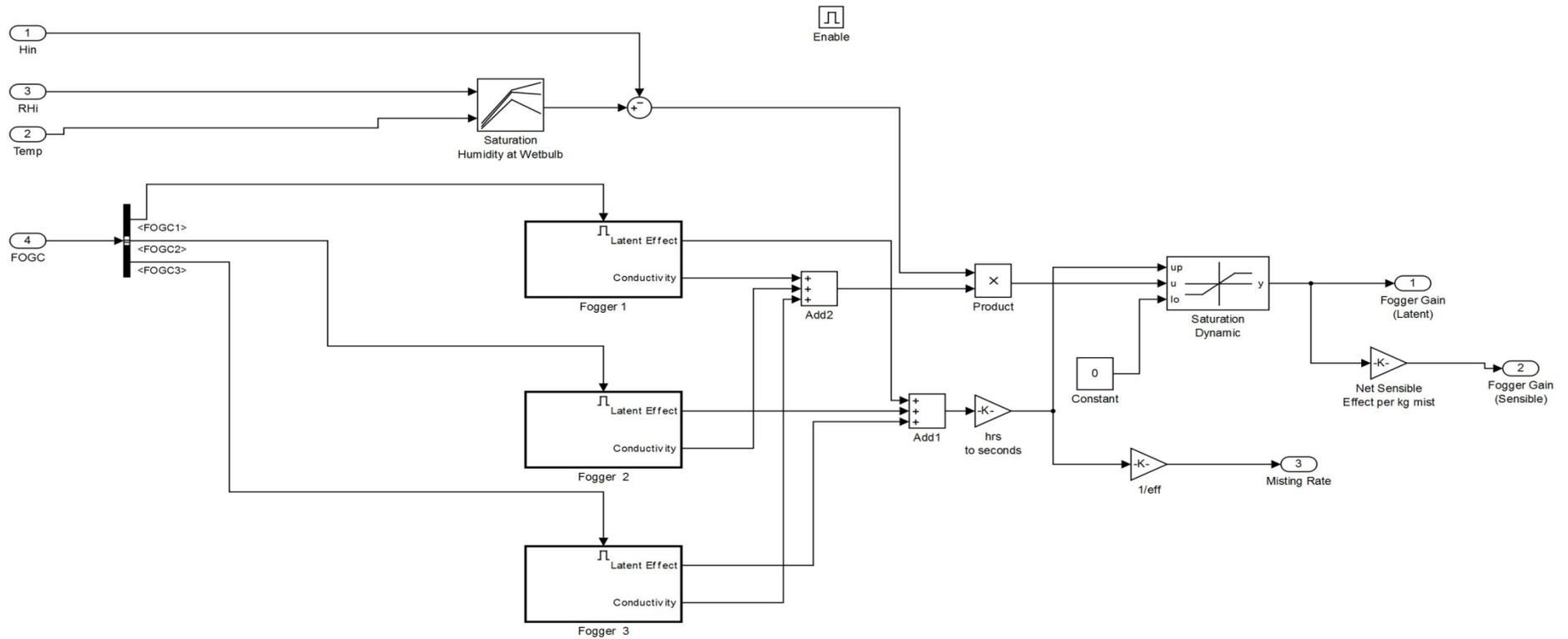


Figure (III.8) : Représentation Simulink du modèle des systèmes de brumisation

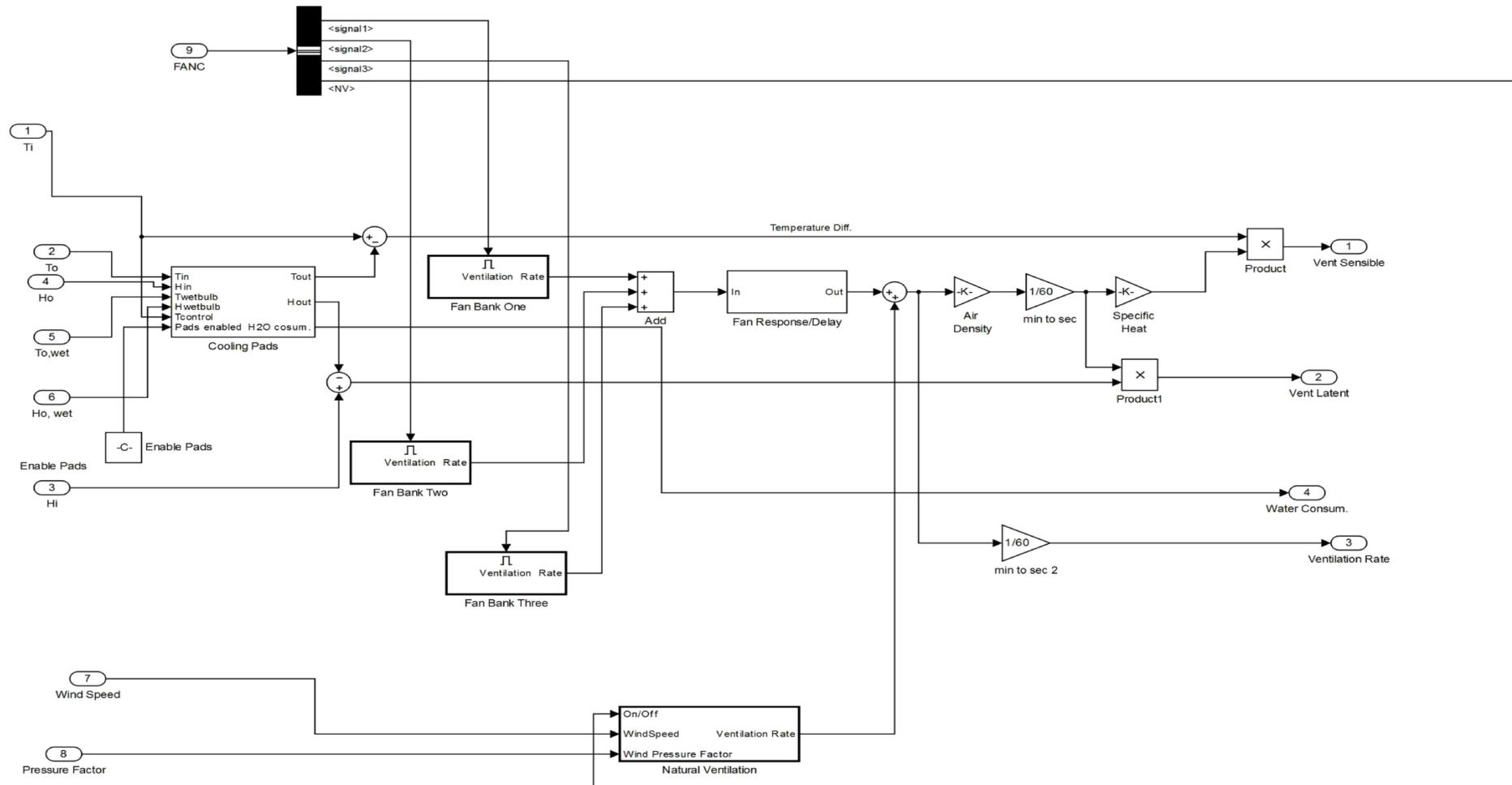


Figure (III.9) : Représentation Simulink du modèle des systèmes de ventilation et de refroidissement

III.5 Modélisation du contrôleur flou

La commande par logique floue (FLC) est très robuste, c'est une méthode flexible qui peut être facilement modifiée, et peut utiliser plusieurs entrées et sorties. Elle est beaucoup plus simple que ses prédécesseurs (équations algébriques linéaires), Et encore très rapide et moins coûteux à mettre en œuvre. Puis les contrôleurs par la logique floue sont très simples et faciles à utiliser. Cette méthode se compose fondamentalement de trois parties: une entrée, une partie de traitement et une partie de sortie :

1) La première partie est une entrée : En effet, elle est représentée dans les fonctions d'appartenance.

2) La deuxième partie est une partie de traitement, ce qu'on appelle les règles des décisions.

3) La troisième et dernière partie, est l'étape de sortie. Le contrôleur convertit les résultats en valeurs spécifiques, qu'il peut gérer par un autre système.

Une des premières questions à poser lors de la conception d'un contrôleur par la logique floue (FLC) est la suivante: Quelles sont mes entrées et sorties? Une fois cette question est résolue, l'élément suivant à traiter quel est la plage des entrées et des sorties. Lorsque l'on parle d'ensembles flous, cette gamme est appelée espace universel.

Une valeur de sortie contrôlée par la théorie de la logique floue (FLC), est développée à l'aide du logiciel MATLAB Simulink.

Le FLC est très utilisé lorsque la modélisation du système implique que l'information est rare et imprécise, ou lorsque le système est décrit par un modèle mathématique complexe. Un exemple de ce type de structure, est bien la serre agricole et ses variables tel que la température intérieure, l'humidité relative, la concentration en CO₂ etc. La variable d'état en l'occurrence la température influe et active sur le comportement dynamique de la serre. Elle est non linéaire, est l'une des variables importante et même principale dans le contrôle et la modélisation des serres.

De plus, un FLC est efficace pour faire face à des fonctions continues à l'aide de la fonction d'appartenance (MF) et les règles IF-THEN. En général, un FLC contient quatre parties: fuzzifier, règles des décisions, moteur d'inférence floue et défuzzifier.

Tout d'abord, un ensemble de données d'entrée est rassemblé et converti en un ensemble flou en utilisant des variables linguistiques floues, des termes linguistiques flous et des fonctions d'appartenance. Cette étape est connue sous le nom de la Fuzzification. Ensuite, une inférence est faite sur la base d'un ensemble de règles. Enfin, la sortie floue

résultante est mise en correspondance avec une sortie nette à l'aide des MF (fonctions d'appartenance) dans l'étape de la defuzzification .

La méthode d'inférence floue de Mamdani [64.65]. est la méthode qu'on a utilisé et appliqué dans notre travail pour optimiser la gestion du microclimat de notre modèle de la serre agricole, Cette méthode a des règles floues de la forme (IF-THEN) (figure III.13) qui ont été utilisée pour mettre en œuvre la modélisation du contrôleur flou (FLC).

Dans de nombreuses applications floues, les fonctions d'appartenance (MF) ont été arbitrairement choisies comme des courbes trapézoïdales, triangulaires ou gaussiennes selon les plages sélectionnées.

Dans notre modèle, la fonction d'appartenance sigmoïde est considérée pour définir les variables d'entrée et triangulaire pour les variables de sortie (figure III.10).

Toutes les fonctions d'appartenance sont définies sur le domaine normalisé [-1,1] dans l'univers du discours. Avec huit valeurs linguistiques, comme indiqué dans la (figure III.12)

Cette figure illustre les ensembles flous de fonction d'appartenance qui contient sept ensembles flous. Les valeurs linguistiques des ensembles flous utilisés sont:

Très froide (TVCOLD), Froide (TCOLD), Peu froide (TCOOL), OK (TGOOD), Peu chaude (TSH), Chaude (TH), Très chaude (TVH), Surchauffé (TEH). Notre base de règles a été conçue sur la base des connaissances d'experts et dans la Littérature spécialisée.

Nous avons ajouté à notre modèle de la serre un régulateur intelligent en utilisant la logique flou et on a choisi la méthode de Mamdani avec une seule entrée, on a commencé tout d'abord par définir les données d'entrées et les sorties, et par la suite on a essayé de lier les fonctions d'appartenances d'une façon logique afin de répondre aux étapes suivantes :

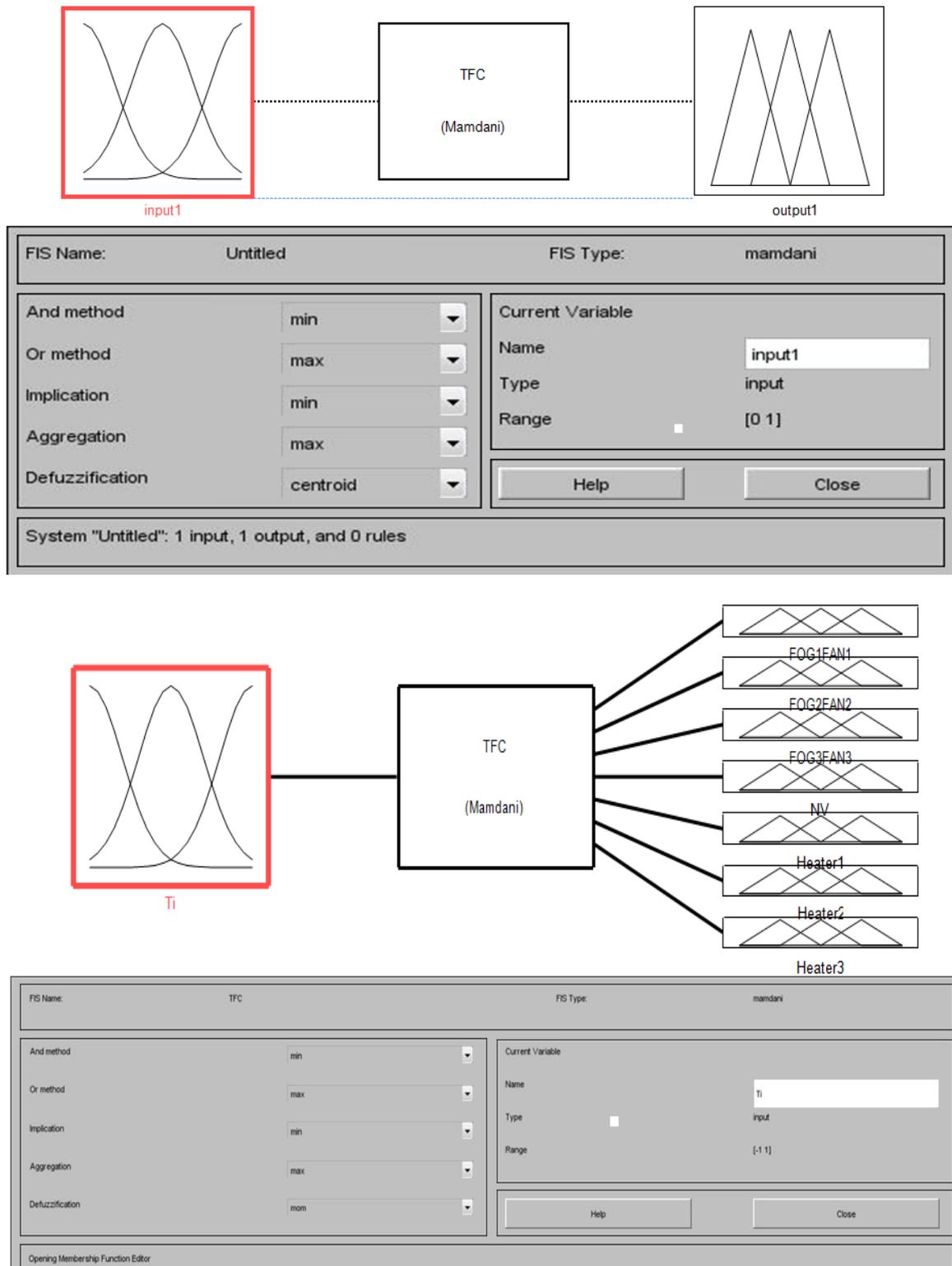


Figure (III.10) : Création d'entrée et de la sortie

Ensuite on a défini les plages de variations (les ensembles flous) et les fonctions d'appartenance pour l'entrée et la sortie, et on a appelé chaque partie de la fonction d'appartenance par un nom significatif.

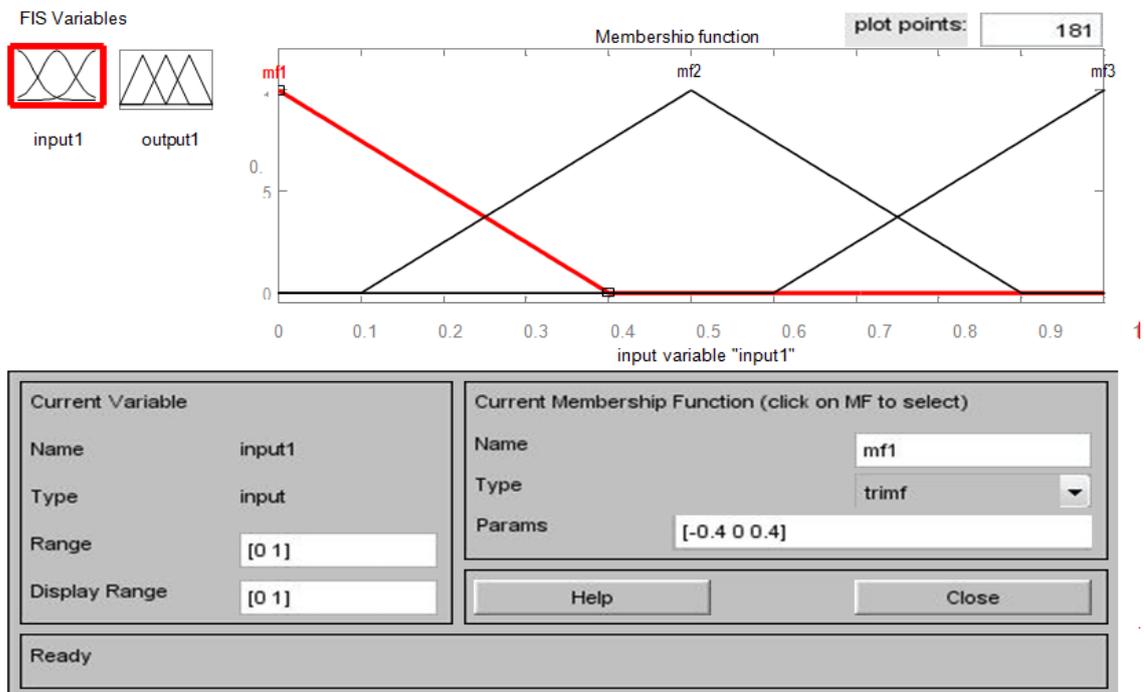


Figure (III.11) : Fonction d'appartenance de la commande

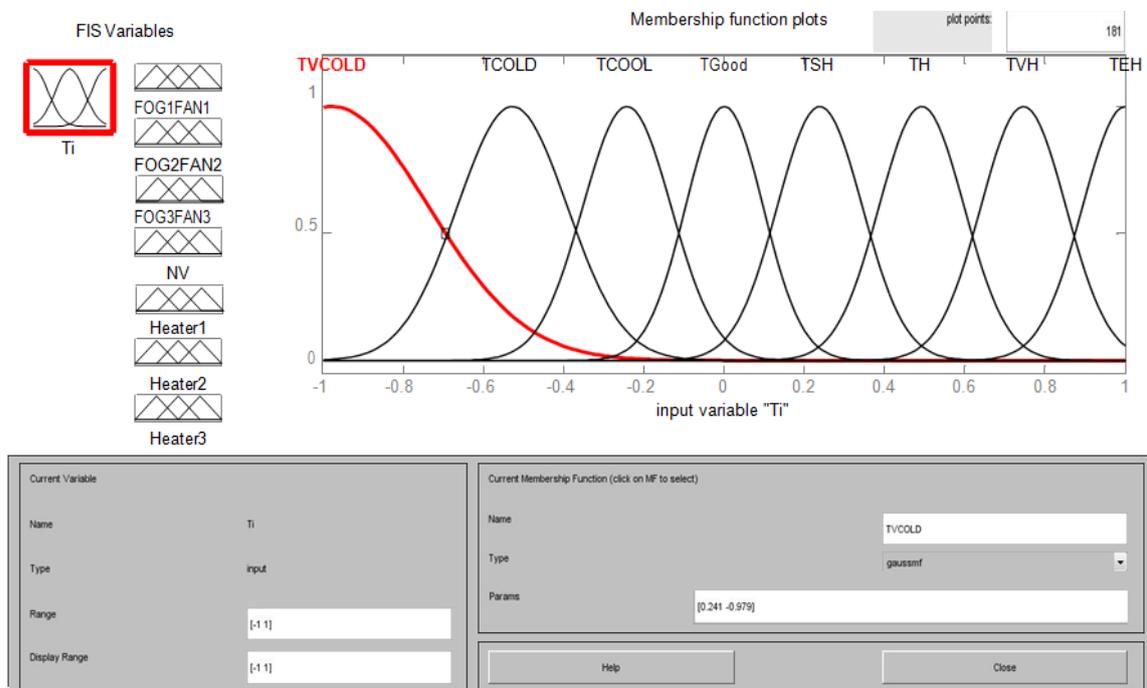


Figure (III.12) : Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de la sortie

Après avoir défini les fonctions d'appartenance, on a fait implémenter les règles d'inférences, de telle façon à réaliser un contrôle optimal comme on le désire, par exemple si le climat à l'intérieur de la serre devient chaud, le régulateur va automatiquement abaisser la température par la fermeture d'un système de chauffage ou l'ouverture d'un système de refroidissement ou par une autre manière et tout ça, dans le but de garder la consigne exigée qui sera traduite par la commande suivante :

- 1.If (Ti is TVCOLD) then (FOG1FAN1 is OFF)(FOG2FAN2 is OFF)(FOG3FAN3 is OFF)(NV is OFF)(Heater1 is ON)(Heater2 is ON)(Heater3 is ON) (1)
- 2. If (Ti is TCOLD) then (FOG1FAN1 is OFF)(FOG2FAN2 is OFF)(FOG3FAN3 is OFF)(NV is OFF)(Heater1 is ON)(Heater2 is ON)(Heater3 is OFF) (1)
- 3. If (Ti is TCOOL) then (FOG1FAN1 is OFF)(FOG2FAN2 is OFF)(FOG3FAN3 is OFF)(NV is OFF)(Heater1 is ON)(Heater2 is OFF)(Heater3 is OFF) (1)
- 4. If (Ti is TGood) then (FOG1FAN1 is OFF)(FOG2FAN2 is OFF)(FOG3FAN3 is OFF)(NV is OFF)(Heater1 is OFF)(Heater2 is OFF)(Heater3 is OFF) (1)
- 5. If (Ti is TSH) then (FOG1FAN1 is OFF)(FOG2FAN2 is OFF)(FOG3FAN3 is OFF)(NV is ON)(Heater1 is OFF)(Heater2 is OFF)(Heater3 is OFF) (1)
- 6. If (Ti is TH) then (FOG1FAN1 is ON)(FOG2FAN2 is OFF)(FOG3FAN3 is OFF)(NV is OFF)(Heater1 is OFF)(Heater2 is OFF)(Heater3 is OFF) (1)
- 7. If (Ti is TVH) then (FOG1FAN1 is ON)(FOG2FAN2 is ON)(FOG3FAN3 is OFF)(NV is OFF)(Heater1 is OFF)(Heater2 is OFF)(Heater3 is OFF) (1)
- 8. If (Ti is TEH) then (FOG1FAN1 is ON)(FOG2FAN2 is ON)(FOG3FAN3 is ON)(NV is OFF)(Heater1 is OFF)(Heater2 is OFF)(Heater3 is OFF) (1)

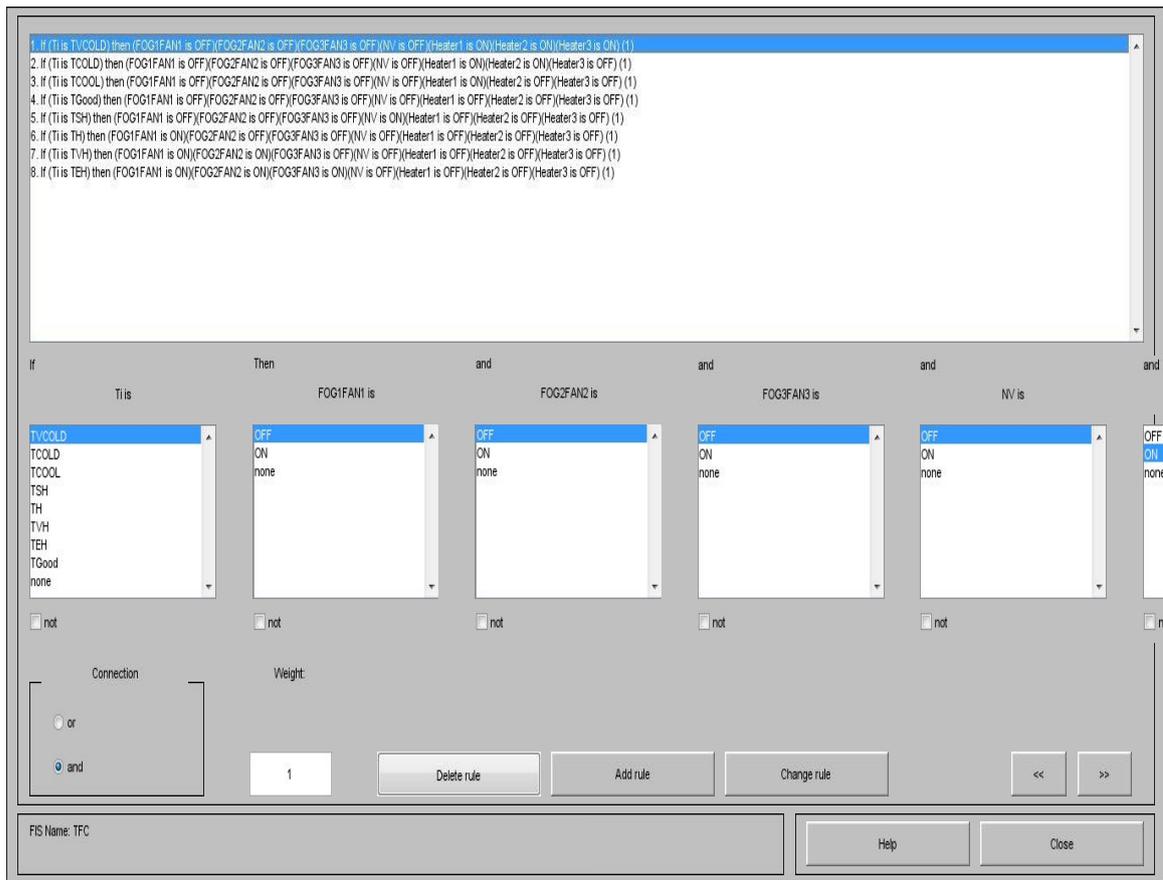


Figure (III.13) : Implémentation des règles d'inférence

On finit par enregistrer le fichier (.fis) pour le charger par la suite dans le workspace et le récupérer dans le bloc Fuzzy de Simulink sous le même nom du fichier enregistré.

La simulation de notre système a été fait par MATLAB SIMULINK ,Les résultats du logiciel MATLAB / SIMULINK indiquent la grande capacité de la technique proposée à contrôler la température intérieure de la serre même en cas de changement rapide des conditions atmosphériques. La modélisation du système est définie sous la forme de ce schéma du bloc introduit dans notre Simulink représenté dans la figure (III.9). Qui a pour but d'atteindre la température de consigne de 20 °C exigée par l'environnement interne de notre serre. En effet en variant les plages d'inférences on a augmenté l'efficacité du régulateur autour de cette consigne, On pourrait également modifier les règles d'inférences ou les formes des fonctions d'appartenances utilisées.

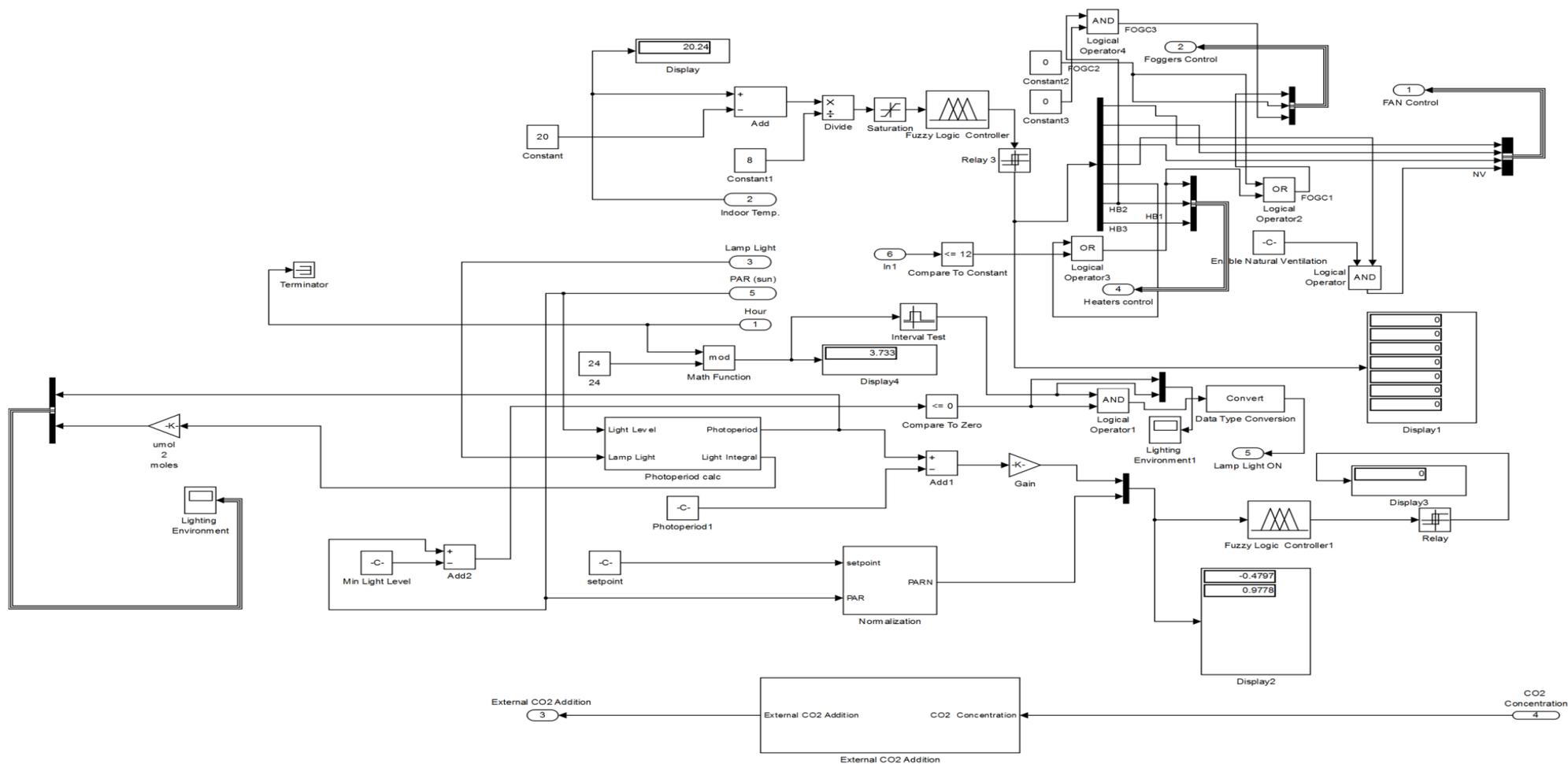


Figure (III.14) : Schéma Simulink représente notre contrôleur flu

CHAPITRE IV

Résultats de Simulations

Les résultats du logiciel MATLAB / SIMULINK indiquent la grande capacité de la technique proposée pour contrôler le climat à l'intérieur de la serre (température, humidité) même en cas de changement rapide de conditions atmosphériques.

Les résultats de la simulation visualisent clairement le comportement thermo-énergétique réel de la serre agricole, dans deux zones différentes, la première est humide pour Dar El-Beida Alger et le deuxième est aride pour la willaya de Biskra (zone saharienne). Ceci nous a permis de connaître les capacités et les performances de notre contrôleur flou.

On a créé deux bases de données pour les deux régions (Biskra et Dar El Beida), sur un fichier CSV qui contient des mesures horaires des paramètres météorologiques pour l'année 2015 (1 janvier au 31 décembre), qui sont traitées sur Excel et exportées vers MATLAB pour la simulation.

IV.1) Résultats de simulation Pour la région humide (Dar EL Beida)

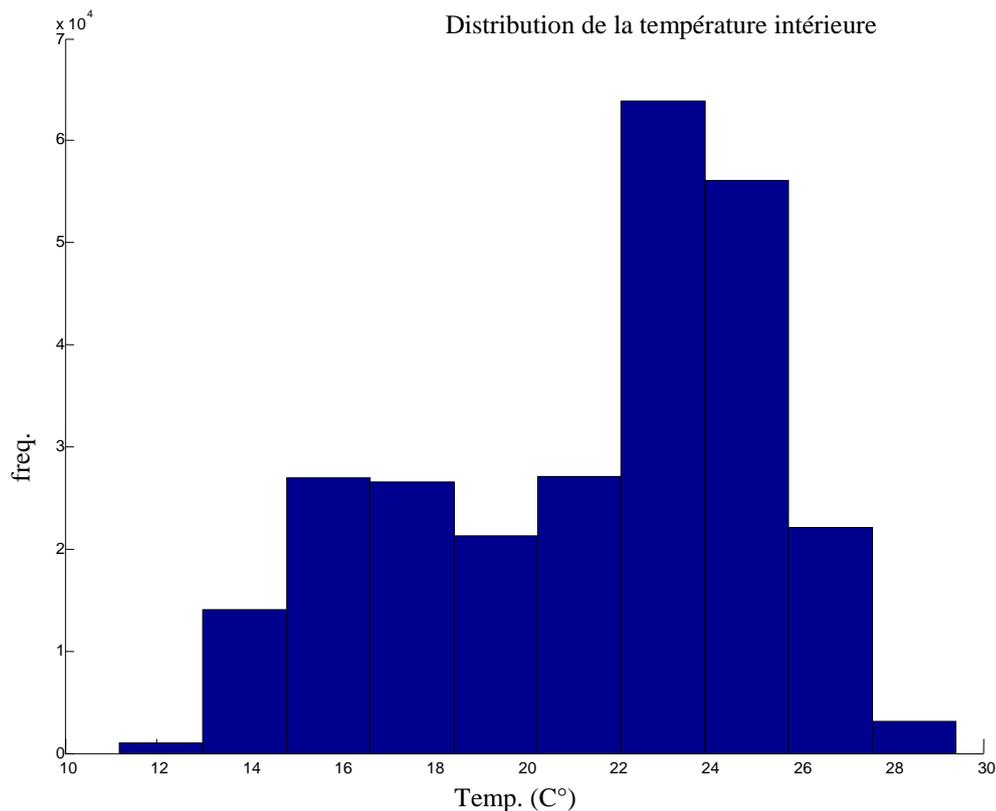


Figure (IV.1) : Histogramme de la distribution de la température intérieure

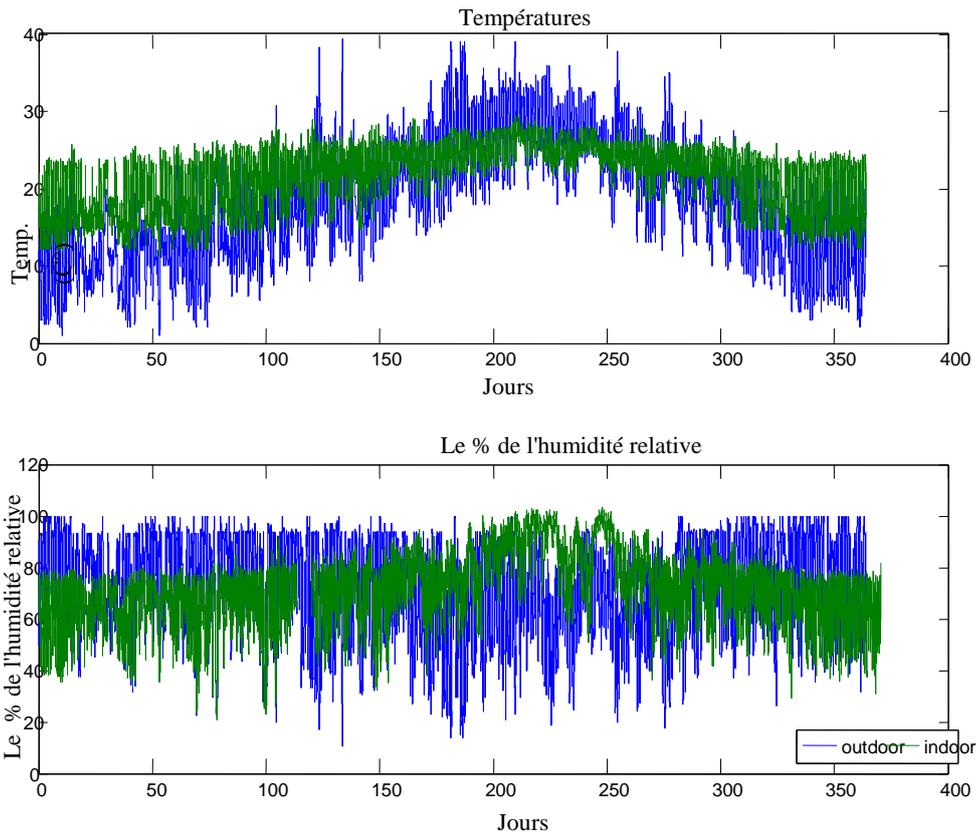


Figure (IV.2) : L'évolution de l'humidité et de la température des ambiances internes et externes

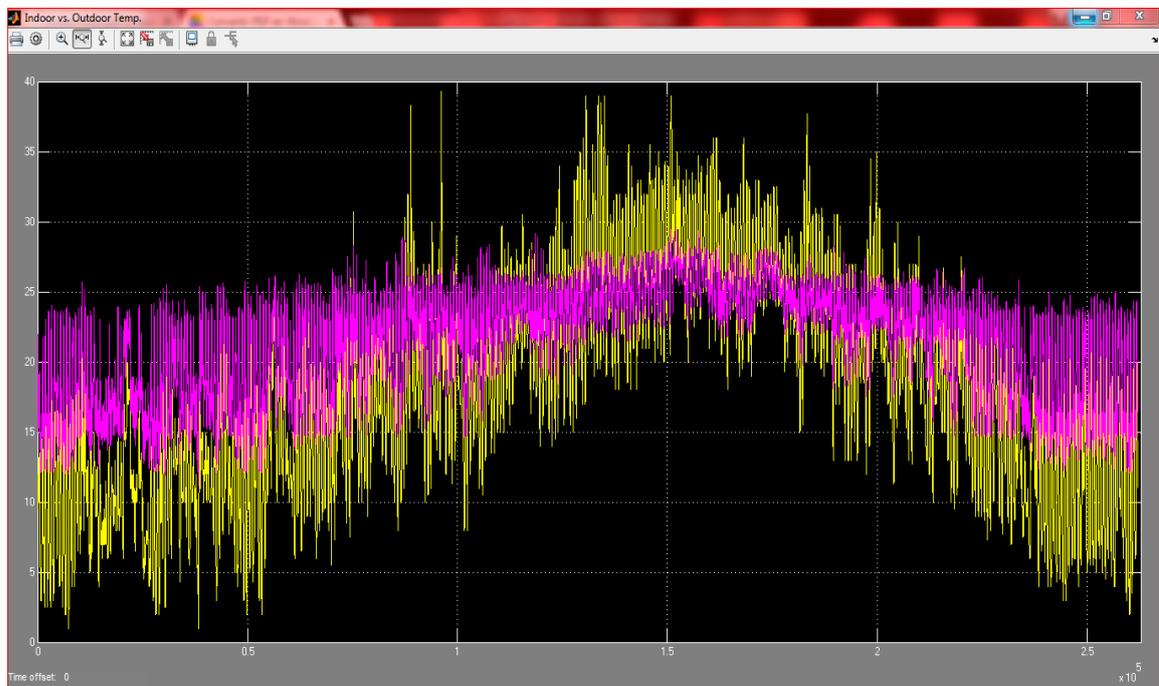


Figure (IV.3) : L'évolution de la température intérieure et extérieure sous forme de scoop

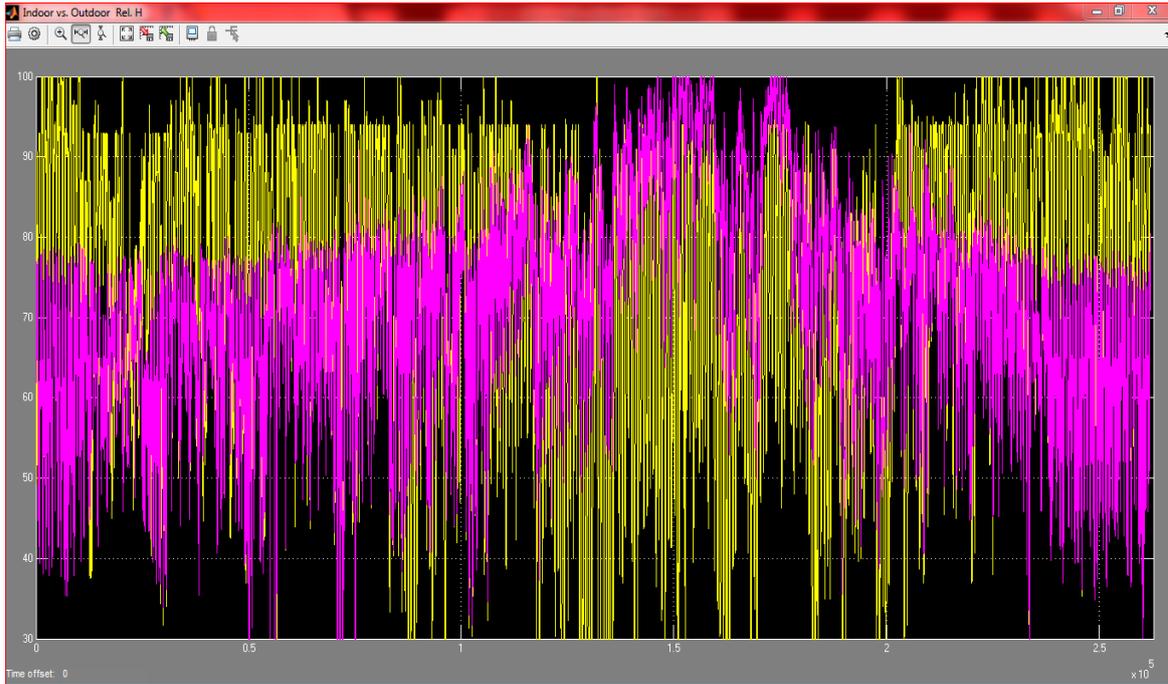


Figure (IV.4) : L'évolution de l'humidité intérieure et extérieure sous forme de scoop

Caractéristiques productrices de la plante

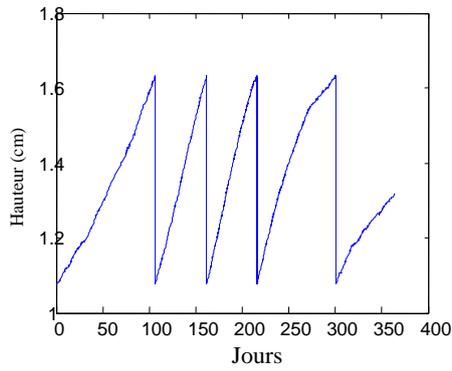


Figure 1

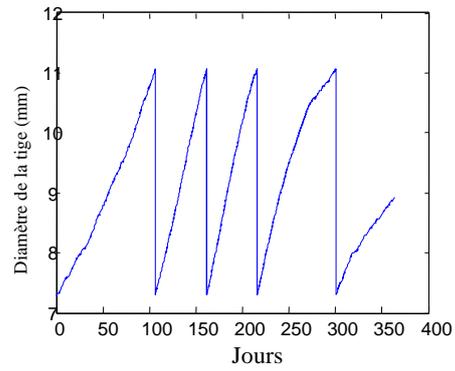


Figure 2

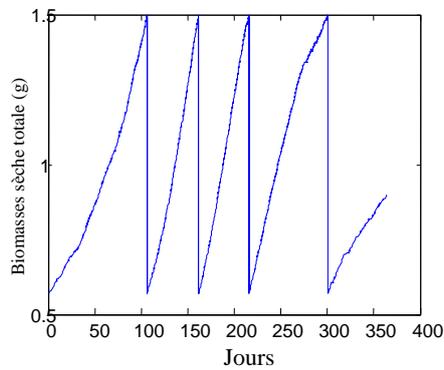


Figure 3

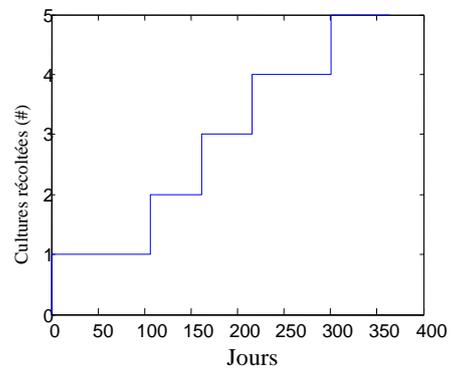


Figure 4

Figure (IV.5) : La figure 1 :Hauteur de la plante en cm, la figure 4 :Nombre cumulé de saisons, la figure 3 :Biomasse totale (poids sec), et la figure 2:Diamètre de la tige en mm.

IV.2) Résultats de simulation Pour la région aride de Biskra

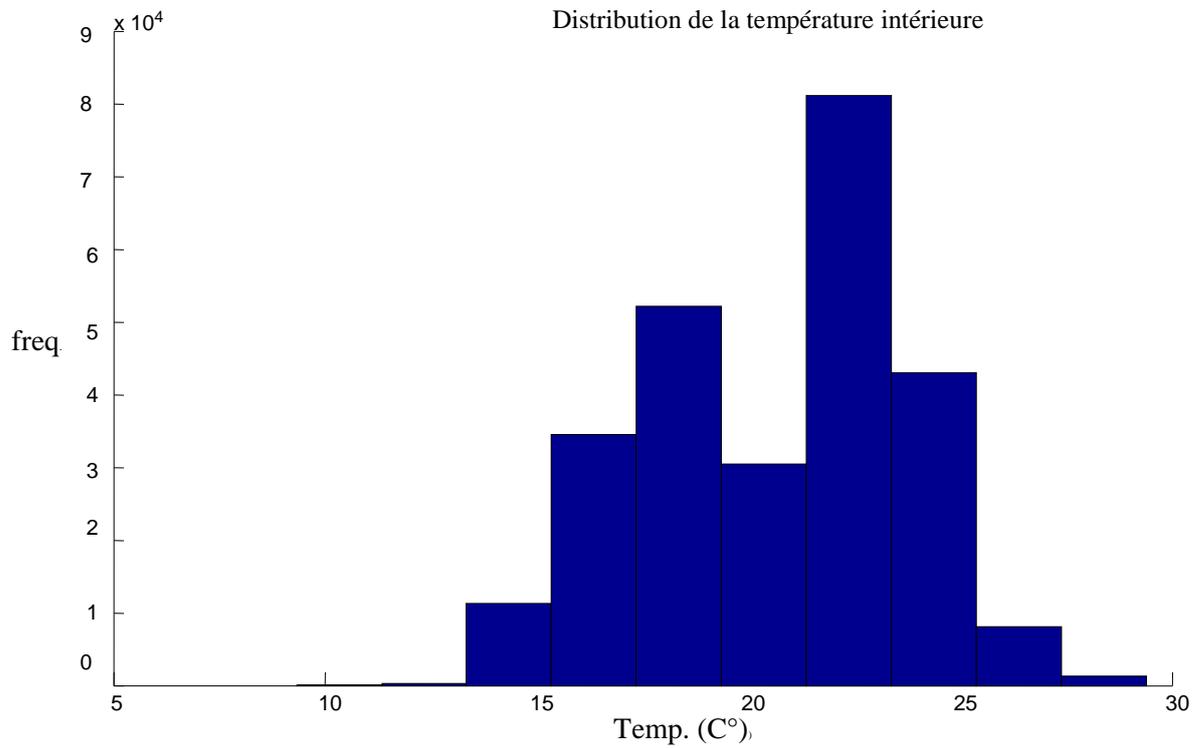


Figure (IV.6) : Histogramme de la distribution de la température intérieure

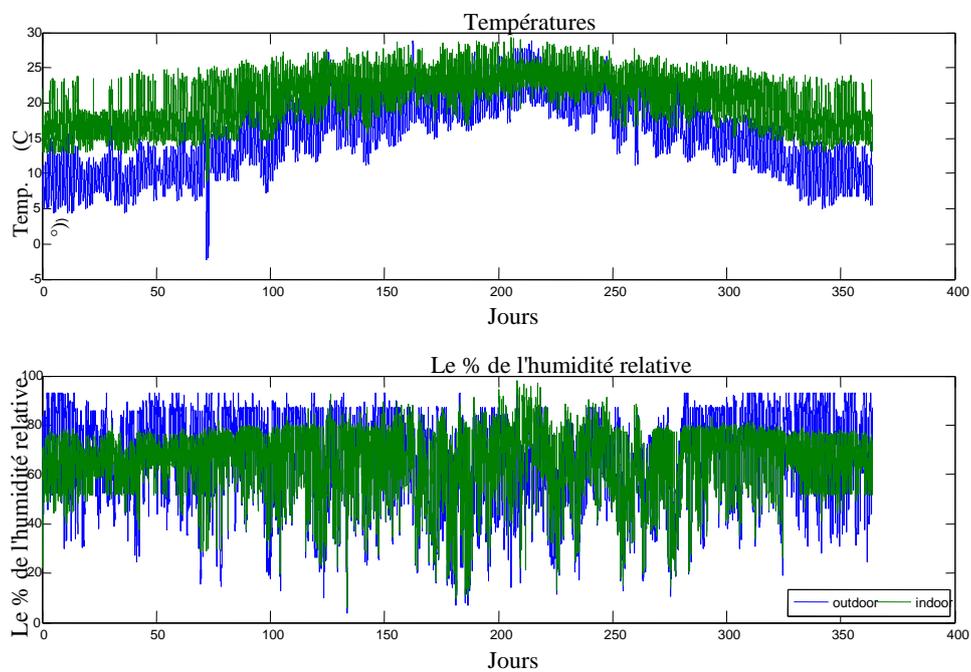


Figure (IV.7) :L'évolution de l'humidité et de la température des ambiances internes et externes

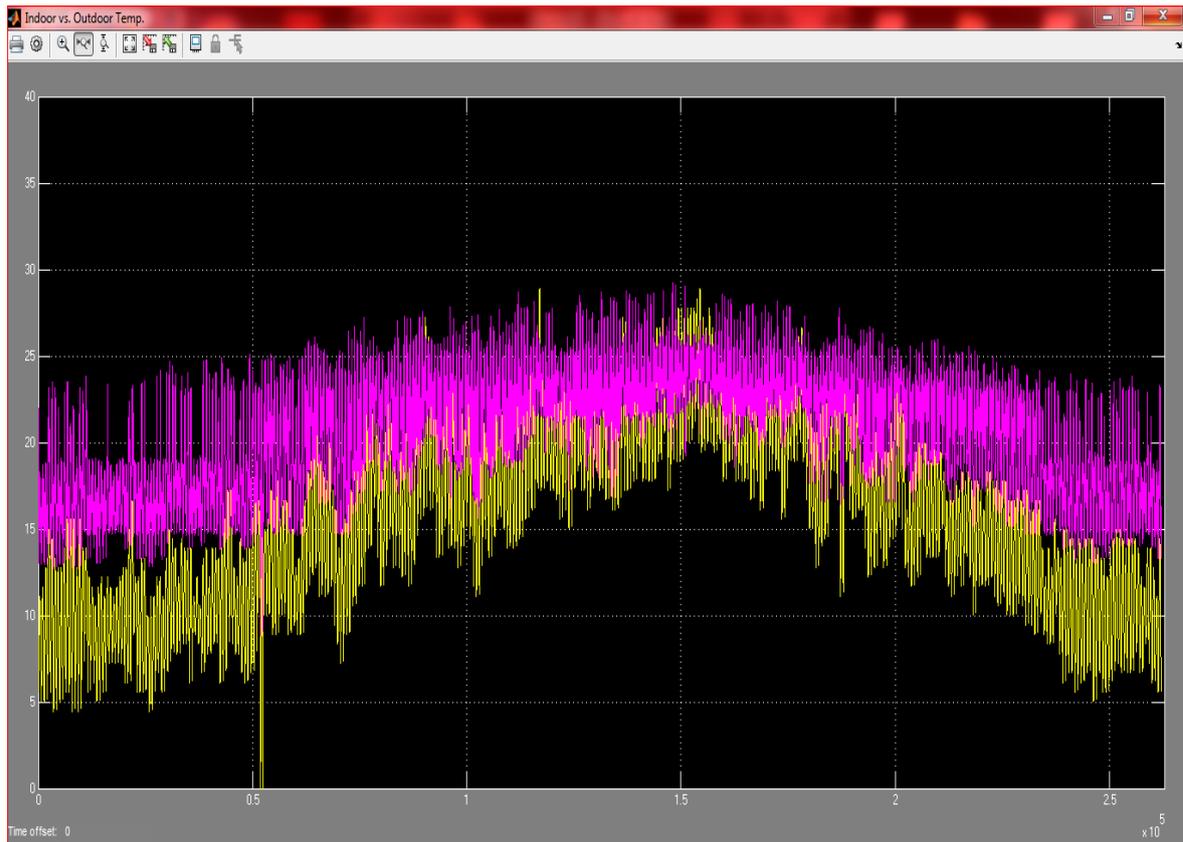


Figure (IV.8) : L'évolution de la température intérieure et extérieure sous forme de scoop

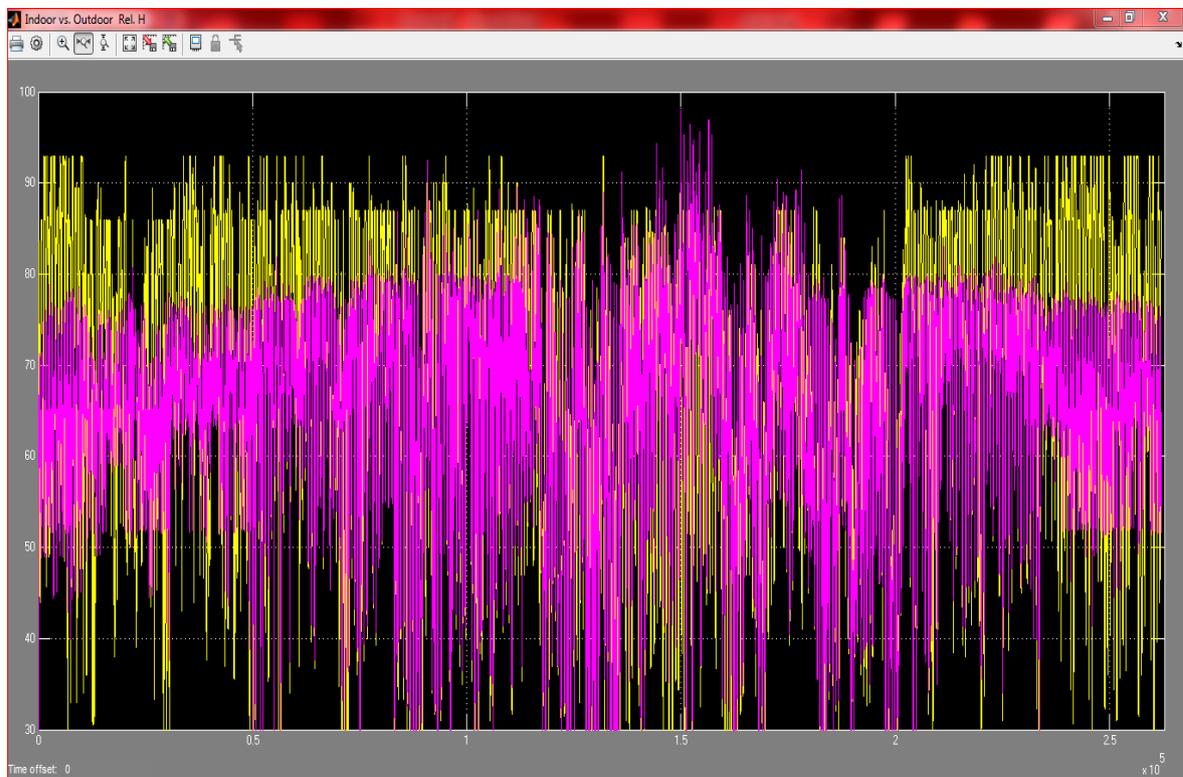


Figure (IV.9) : L'évolution de l'humidité intérieure et extérieure sous forme de scoop

Caractéristiques productrices de la plante

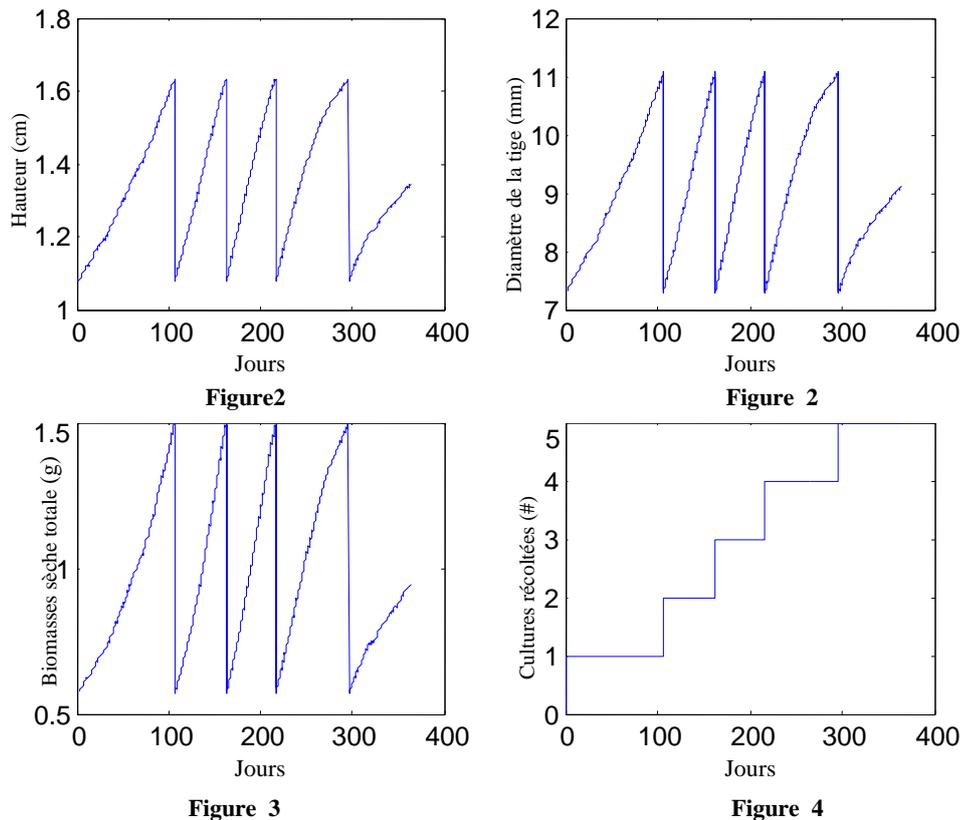


Figure (IV.10) : La figure 1 :Hauteur de la plante en cm, la figure 4 : Nombre cumulé de saisons, la figure 3 :Biomasse totale (poids sec), et la figure 2 :Diamètre de la tige en mm.

IV.3) Discussions des résultats

Les résultats de simulation démontrent les capacités et performances du contrôleur intelligent, ainsi que la robustesse de la commande floue. Ils illustrent dans les (figures IV1,2,3 et IV6,7,8) la stabilité de la variation de températures intérieures de jour comme de nuit allant de 15°C à 25°C et un taux d'humidité relative variant de 50% à 80% dans les serres des deux régions de Dar El Beida (zone humide) et de Biskra (zone aride). Le gradient de température dû à l'effet de serre, enregistré entre l'intérieur et l'environnement extérieur était positif et variant de $+2^{\circ}\text{C}$ à $+14^{\circ}\text{C}$. Il faut noter que le taux d'humidité extérieur de la zone Dar El Beida, variant de 50% à 95% était plus important que celui de Biskra qui varie de 35% à 80%. Des perturbations de la température ont été enregistrées pendant la cinquième saison à partir de mi- automne au début d'hivers, entre le 20 novembre et le 20 janvier de l'année. Ceci a été matérialisé par des pics de températures et saturations hydriques due essentiellement aux déperditions thermiques et aux bruitages du signal provoqués par l'activation et la désactivation cyclique répété des systèmes et

équipements de chauffage et de ventilation. Dans l'ensemble l'application de la méthode floue présente des résultats plutôt satisfaisants.

La nécessité d'améliorer l'isolation thermique de la serre agricole est indispensable pour diminuer les déperditions de chaleur qui se produisent généralement pendant cette saison froide au sein de la serre. Améliorer l'effet de serre, c'est stabiliser le microclimat et réduire le nombre d'activations et de désactivations des systèmes d'accompagnement qui posent en partie le problème de gestion climatique.

Dans les figures (IV. 2,4,7,9), Le taux d'humidité à l'intérieur de la serre dans les deux zones humide et aride, se maintient généralement près de l'optimum sauf en été où le taux d'humidité chute parfois au dessous du seuil minimum en raison de la ventilation indispensable pour aérer, compenser et réguler la température intérieure. La nécessité d'introduire des rampes de brumisation dans les serres permet de compenser cette insuffisance hygrométrique et palier à cette carence.

Les figures (IV.5 et IV10) représentent les caractéristiques physiologiques de croissance et de développement de la plante à travers le diamètre de la tige, la hauteur de la plante et de son poids . Il faut signaler que la production a été étalée sur quatre récoltes dans l'année alors que la cinquième saison a été caractérisée par une croissance lente des plantes due aux perturbations enregistrées pendant cette période, au photopériodisme et aux effets de bruitage du signal.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux de recherches, ont été entamés par une étude bibliographique riche et intéressante, qui nous a permis de découvrir ce domaine d'actualité. Une description des types et modèles de serres agricoles ont été développés. Les interactions thermo-hydrigue, qui se produisent au sein de la serre ont été approchés. L'état biophysique et physiologique des plantes à travers la photosynthèse, la respiration et l'évapotranspiration ont été exposés tout en tenant compte de leurs influences sur le milieu ambiant immédiat et sur le mode de la climatisation. Les modèles de régulation et de contrôle climatique ont été abordés depuis l'emploi d'appareillages classiques à l'utilisation de l'intelligence artificielle et/ou logique floue. Les modèles de connaissance et les techniques d'informatiques ont été établis suivant une approche et une hiérarchie bien déterminées pour une gestion climatique optimale des systèmes-serre, tout en adoptant bien entendu la méthode de Mamdani.

Il s'agit là de mettre au point une technique de commande de la climatisation stable et robuste face aux perturbations qui peuvent se produire dans les milieux environnants externe et interne au système-serre

Nos travaux ont pour missions :

1) De définir le fonctionnement du système complexe que constitue la serre avec ses différentes composantes (culture-environnement immédiat) en utilisant des modèles de commande qui permettent de réguler d'une manière optimale le climat intérieur de la serre et de reproduire l'essentiel des propriétés, des mécanismes et des interactions entre la culture et son environnement

2) De résoudre le problème de suivi par la modélisation, la conception et la mise au point d'un contrôleur intelligent capable de réguler le système par le suivi d'une trajectoire de référence désirée et une hiérarchie de commande et de régulation des couplages entre les différentes entrées et / ou sorties

Dans ce travail nous développons une commande climatique par la méthode de Mamdani à base de modèles multi-variables en ligne pour une structure de modèle neuronal adaptif. L'influence des perturbations aléatoires sur les performances et l'optimisation du système doivent être prises en charge.

Nous avons conceptualisé, modéliser, configurer et développer un contrôleur intelligent par la logique floue sur la base de la méthode de Mamdani. La simulation de la gestion climatique optimale de l'environnement intérieur de la serre agricole a été réalisée pour deux régions différentes, l'une humide, et il s'agit de Dar El Beida à ALGER ; l'autre aride et concerne la région de BISKRA.

Les résultats de simulation mettent en relief les capacités, et les performances du contrôleur intelligent, ainsi que la robustesse de la commande floue. Ils illustrent par ailleurs l'intelligibilité de cette commande pour une gestion optimale durant les quatre saisons de production. Nous avons aussi enregistré des insuffisances qui ont surgies lors du fonctionnement du système durant la cinquième saison, allant du mi-automne au début d'hivers (du 20 novembre au 20 janvier). Cet état de fait est dû essentiellement aux déperditions thermiques et au bruitage du signal provoqué par l'activation et la désactivation cyclique répétée des équipements de climatisation (chauffage et ventilation). Cela s'explique par le fait que ces variables d'état sont fortement corrélées et influencées par l'environnement extérieur, notamment par les rayonnements solaires dans le visible et l'infrarouge et la réponse physiologique de la culture, une réaction tout à fait naturelle et implicite.

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 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.
- 3) La gestion optimale de l'apport énergétique nécessaire au fonctionnement des systèmes et équipements d'accompagnements.

- 4) Une meilleure productivité des cultures abritées.
- 5) Une diminution sensible de l'intervention humaine.

De la même façon il faut signaler les insuffisances qui peuvent surgir dans l'application de la méthode logique floue et qui proviennent pour le moment d'une mauvaise compréhension ou d'une insuffisance d'informations des écosystèmes et de leurs environnements, des perturbations, des problèmes de bruitages du signal, de la robustesse de la commande floue, des pics des variables dominantes ; néanmoins pour le moment tous ces problèmes d'interférences et ces carences peuvent être résolus par une approche réaliste du système.

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 peu abordés jusqu'à ce jour. Nous proposons dans notre domaine de promouvoir ces techniques pour multiplier les saisons de récoltes et rentabiliser l'exploitation de nos terres agricoles.

NOMENCLATURE

$dT_{air\ int}$: Température de l'air à l'intérieur de la serre	(K)
$\rho_{air\ int}$: Densité de l'air	(kg.m ⁻³)
$c_{air\ int}$: Chaleur spécifique de l'air	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
V_{serre} : Volume de la serre agricole	(m ³)
$R_{solaire}$: Flux de chaleur fourni par le rayonnement solaire	(J.s ⁻¹)
$Q_{ventilation}$: Echange de chaleur causé par la ventilation	(J.s ⁻¹)
$\alpha_{int\rightarrow cov}$: Coefficient de transfert de chaleur	(W.m ⁻² .K ⁻¹)
A_{cov} : Surface de la couverture	(m ²)
T_{cov} : Température de la couverture	(K)
$A_{tuy\ de\ chauff}$: Surface des tuyaux de chauffage	(m ²)
Rad : Est la densité du rayonnement solaire	(W.m ⁻²)
φ : Pente du toit	(°)
Φ_{vent} : Le débit d'air	(W)
k_n : Degré d'ouverture des ventilateurs	(%)
v_{ext} : La vitesse du vent extérieur	(m.s ⁻¹)
$\sigma, \chi, \zeta, \xi, \Psi$: Sont des constantes	
k_n : Le débit d'air dépend du degré d'ouverture sur le côté du vent.	
v_{ext} : La vitesse extérieure du vent	(m/s)
r_0 : Est la chaleur de vaporisation ou de condensation	(J.kg ⁻¹)
$A_{feuille}$: Surface feuille de la plante	(m ²)
M_{transp} : Est le flux massique par m ² de surface	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
$LH * \Phi_{H2O_cond_cov,int}$: Est la chaleur latente causée par la condensation	
$\Phi_{H2O_air\rightarrow airS.Ecr}$: Est la quantité de l'eau	(kg s ⁻¹)

Nomenclature

$\Phi_{H2O_cond_covint}$: Est la vitesse de la condensation de l'eau (kg s ⁻¹)	
$\Phi_{H2O_cond_EcrSup}$ et $\Phi_{H2O_cond_EcrInf}$: Sont la chaleur latente	(kg s ⁻¹)
$R_{FIR_sortant_Ecr}$: Est le débit sortant de FIR	(W)
$Q_{Syst.Chauff.Inf\rightarrow air}$: La chaleur sensible	(W)
$R_{rayons.LAMP\rightarrow air}$:Le gain de chaleur sensible	(W)
$LH * \Phi_{H2O_brouillard}$: Est la chaleur latente	(J.s ⁻¹)
V_{air}	: Est le volume de l'air	(m ³ _{air})
$Q_{solj-1\rightarrow solj}$: Est le flux de chaleur par conduction	(W)
A_i	: Est la surface de l'objet i .	(m ²)
$(\varepsilon_i$ et $\varepsilon_j)$ [-]	: Sont les coefficients thermique d'émission infrarouge pour l'objet i et j respectivement.	
$F_{i\rightarrow j}$ [-]	: Est le facteur de vue de la surface i à j .	
σ	: Est la constante de Stefan Boltzmann	(W m ⁻² K ⁻⁴)
f_{int}	: La teneur en eau	(g.m ⁻³)
M_{vent}	: Flux massique dû à la ventilation	(kg.m ⁻² .s ⁻¹)
VPD	: Déficit de la pression de vapeur	(Pa)
$m_1 T_{ext} - T_{cov} ^{m_2}$: Coefficient de transfert de masse.	
m_1 et m_2	: Des paramètres fixes du coefficient de transfert de masse.	
$f_{int\ max}$: La teneur maximale en eau de l'air à l'intérieur de la serre	(g.m ⁻³)
$Q_{fournie_tuyaux}$: Est la puissance thermique	(W)
K_{p_tuyaux}	: Est la constante de proportionnalité	(W K ⁻¹ m ⁻²)
$U_{ouverture\ du\ toiture}$ [-]	: Est le signal de sortie du contrôleur	
$C_{H2O_{air}}$: Est la concentration en vapeur d'eau dans l'air	(kg m ⁻³)
$C_{H2O_{ref}}$: Est l'humidité désirée	(kg m ⁻³)

Nomenclature

$Q_{H_2O_brouillard}$: Est le débit d'eau fourni sous forme de brouillard dans la serre	(kg s ⁻¹)
VP_i	: Est la pression de vapeur d'eau de la zone i	(Pa)
MM_{H_2O}	: Est la masse molaire d'eau	(kg mol ⁻¹)
R	: Est la constante de gaz idéale	(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
VP_{sat}	: Est la pression de saturation en vapeur d'eau à la température T	(Pa)
$C_{H_2O_i}$, $C_{H_2O_{sat_i}}$: Concentration de saturation	(kg {H ₂ O} m ⁻³)

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1) : Photo d'une serre tunnel	7
Figure (I.2): Structure d'une Serre d'horticulture constituée de deux chapelles et de trois modules chacune, Waquant (2000)	8
Figure (I.3) : Serre multi chapelles	13
Figure (I.4) : Serre doubles chapelles	13
Figure (I.5) : Serre petit tunnel	13
Figure (I.6) :Serre de multiplication	13
Figure (I.7) :Schéma de la classification des serres agricoles	14
Figure (I.8) :Serre Horticole	15
Figure (I.9) :Serre Florale.....	15
Figure (I.10) :Aération par un seul versant	22
Figure (I.11) :Aération par double versant	22
Figure (I.12) :Les différents modes d'aération latérale des serres	23
Figure (I.13) : Une représentation schématique des processus physiques d'échange d'énergie dans les systèmes de production de serre.....	26
Figure (II.1) : Structure du contrôleur PID adaptatif.....	38
Figure (II.2) : Le système de contrôle I-DF.....	40
Figure (II.3) :Le système de contrôle PDF.....	40
Figure (II.4) : Structure de contrôle PD-0F appliquée au modèle de processus.....	41
Figure (II.5) : Un système typique de logique floue.....	45
Figure (II.6) : Interprétation graphique de la règle minimale de Mamdani.....	47
Figure (II.7) : Interprétation graphique de la règle de fonctionnement de Larsen	48
Figure (II.8) : Système de contrôle adaptatif.....	51
Figure (II.9) : Modèle adaptatif de référence (MRAS)	52
Figure (II.10) : Représentation schématique d'un réseau neuronal feedforward entièrement connecté avec une couche cachée et une seule sortie	54
Figure (II.11) : Organigramme d'algorithme génétique	58
Figure (III.1) : Schéma de la serre modélisée.....	65
Figure (III.2) : Idée de base de la modélisation de chaque surface	77
Figure (III.3) : Bloc pour modéliser chaque surface	78
Figure (III.4) : Code d'organisation pour notre modèle.....	87
Figure (III.5) : Schéma Simulink représente notre modèle global de la serre.....	89

Figure (III.6) : Représentation Simulink du modèle de micro climat de la serre	90
Figure (III.7) : Représentation Simulink du modèle des systèmes de chauffage	91
Figure (III.8) : Représentation Simulink du modèle des systèmes de brumisation	92
Figure (III.9) : Représentation Simulink du modèle des systèmes de ventilation et de refroidissement	93
Figure (III.10) : Création d'entrée et de la sortie	96
Figure (III.11) : Fonction d'appartenance de la commande	96
Figure (III.12) : Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de la sortie	97
Figure (III.13) : Implémentation des règles d'inférence	99
Figure (III.14) : Schéma Simulink représente notre contrôleur flou	100
Figure (IV.1) : Histogramme de la distribution de la température intérieure (Dar El Beida).....	102
Figure (IV.2) : L'évolution de l'humidité et de la température des ambiances internes et externes (Dar El Beida)	103
Figure (IV.3) : L'évolution de la température intérieure et extérieure sous forme de scoop (Dar El Beida).....	103
Figure (IV.4) : L'évolution de l'humidité intérieure et extérieure sous forme de scoop (Dar El Beida).....	104
Figure (IV.5) : La figure 1 est l'hauteur en cm, la figure 4 est le nombre cumulé de plus en plus saison, la figure 3 est la biomasse totale (poids sec), et la figure 2 est la tige diamètre en mm (Dar El Beida).....	104
Figure (IV.6) : Histogramme représente la distribution de la température intérieure (Biskra).....	105
Figure (IV.7) : L'évolution de l'humidité et de la température (intérieures / extérieures) (Biskra).....	105
Figure (IV.8) : L'évolution de la température (intérieures / extérieures) (Biskra)	106
Figure (IV.9) : L'évolution de l'humidité (intérieures / extérieures) (Biskra)	106
Figure (IV.10) : La figure 1 est l'hauteur en cm, la figure 4 est le nombre cumulé de plus en plus saison, la figure 3 est la biomasse totale (poids sec), et la figure 2 est la tige diamètre en mm (Biskra).....	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I.1) : Ordres de grandeurs des caractéristiques principales de divers matériaux de qualité horticole utilisés en couverture de serres..... 12

Tableau(I.2) : Intervalles des températures optimales pour la croissance de certains légumes..... 16

Tableau (I.3) : Besoins des espèce légumières cultivées sous abris en fonction du stade de développement (INRA) 20

Tableau (II.1) : Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurones..... 60

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. P. Torres, R. G. Lopez (2010). «Commercial greenhouse production: measuring Daily Light Integral in a greenhouse» Purdue University Cooperative Extension Service
- [2] A. Sriraman and R. V. Mayorga, A Fuzzy Inference System Approach for Greenhouse Climate Control, *Environmental Informatics Achieves*, Vol. 2(2004),pp699-710.
- [3] ACME Engineering & Manufacturing Corporation (1993). «The greenhouse climate control handbook: engineering principles and design procedures»
- [4] Albright, L. D., R. S. Gates, K. G. Arvanitis, and A. Drysdale. 2001. Environmental control for plants on Earth and in space. *IEEE Control Systems Magazine* 21(5): 28-47.
- [5] Albright, L.D., Gates, R.S., Arvanities, K.G. and Drysdal, A.E. (2001).Environmental control for plants on earth and in space. *IEEE control system magazine*, Oct., pp. 28- 47.
- [6] analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings» *Journal of Agricultural Engineering Research* n. 63
- [7] Anna Raczek, Ewa Wachowicz (February 2014), "Heat and mass exchange model in the air inside a greenhouse", *Scientific quarterly journal I S N 1 4 2 9 - 7 2 6 4 Agricultural Engineering* (2014:1(149):185-195), DOI: <http://dx.medra.org/10.14654/ir.2014.149.020>.
- [8] Antsaklis, P. J. (1999). Intelligent Control. In I. Control (Ed.), *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Argus Control Systems Ltd (2010). «Light and lighting control in greenhouses»
- [10] Argus Control Systems Ltd website: www.arguscontrols.com (last accessed: 3 April 2011)
- [11] Arvanitis, K. G., P. N. Paraskevopoulos, and A. A. Vernardos. 2000. Multirate adaptive temperature control of greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 303-320.
- [12] ASHRAE (2001). «Heat transfer» Chapter 3 in 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook
- [13] ASHRAE (2007). «Environmental control for animals and plants» Chapter 22 in 2007 ASHRAE Handbook – HVAC Applications
- [14] Åström, K., & Murray, R. (2009). *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*: Princeton University Press.
- [15] Åström, K., & Wittenmark, B. r. (1995). *Adaptive control*. Reading, Mass: Addison-Wesley.
- [16] Åström, K., and T. Hägglund. 1998. *PID controllers: Theory, Design and Tuning*. Research Triangle Park, NC: ISA Publications.
- [17] Awad, H. A. (2001).Fuzzy neural networks for modeling and controlling dynamic systems. Ph.D. Thesis, Cardiff School of Eng., Cardiff Univ., UK.
- [18] B. H. E. Vanthoor (2011). «A model-based greenhouse design method» Ph.D Thesis. Wageningen University
- [19] B.R. Gaines, M.L.G. Shaw, From fuzzy logic to expert systems, *Inf. Sci.* 36 (1–2) (1985) 5–16.
- [20] Babuska, R., & Mamdani, E. H. (2008). Fuzzy Control. http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_control.
- [21] Babuska, R., & Mamdani, E. H. (2008).Fuzzy Control. http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_control
- [22] Bakker, J. C., G. P. A. Bot, H. Challa, and N. J. van de Braak. 1995. *Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen.

- [23] Batur, C., Srinivasan, A. and Chan, C.C. (1995). Fuzzy model-based fuzzy predictive controllers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 3, pp. 117-130.
- [24] BENLAHCENE Djaouida, Modélisation du climat sous serre en tenant compte des échanges convectifs et radiatifs, *MAGISTERE EN PHYSIQUE*, Université El-Hadj Lakhdar-Batna.
- [25] Boaventura Cunha, J. (2003). Greenhouse Climate Models: An Overview, EFITA Conference. Obtained from: http://automatica.dei.unipd.it/public/Schenato/TESI/Tosin_2009/material/GREENHOUSE%20CLIMATE%20MODELS%28stamp%29.pdf.
- [26] Bot, G. P. A. 1991. Physical modelling of greenhouse climate. *Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, eds. Y. Hashimoto, and W. Day, 7 12. Oxford, UK: Pergamon Press.
- [27] Bot, G.P.A. (1983). Greenhouse Climate: from physical processes to a dynamic model. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen. Obtained from: <http://www.library.wur.nl/WebQuery/clc/196119>.
- [28] Breemen, A. v., & Vries, T. d. (2000). An Agent-Based Framework for Designing Multi-Controller Systems. Paper presented at the Proceedings of the Fifth International Conference on The Practical Applications of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology, Manchester, U.K.
- [29] C. Panagiotou (1996). «Geothermal greenhouse design» The United Nations University - Geothermal Training Programme, Report number 11
- [30] C. Stanghellini (1987). «Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management» PhD Thesis. Wageningen University
- [31] C.H. Lim et al., Fuzzy human motion analysis: a review, *Pattern Recogn.* 48 (5) (2015) 1773–1796.
- [32] Caponetto, R., L. Fortuna, G. Nunnari, L. Occhipinti, and M. G. Xibilia. 2000. Soft computing for greenhouse climate control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 8: 753-760.
- [33] Center, B. and B.P. Verma. 1997. A fuzzy photosynthesis model for tomato. *Transactions of the ASAE*. 40: 815-821.
- [34] Chao, K., and R. S. Gates. 1996. Design of switching control systems for ventilated greenhouses. *Trans. ASAE* 39: 1513-1523.
- [33] Chao, K., R. S. Gates, and N. Sigrimis. 2000. Fuzzy logic controller design for staged heating and ventilating systems. *Trans. ASAE* 43: 1885-1894.
- [35] CHAOUI, F. Z., GIRI, F. et M'SAAD, M. (2001). Adaptive control of input-constrained type-1 plants stabilization and tracking. *Automatica*, pages 197–203.
- [36] CHAOUI, F., GIRI, F., DION, J., SAAD, M. et DUGARD, L. (2000). Direct adaptive control subject to input amplitude constraint. *IEEE Trans. on Automatic Control*, pages 485–490.
- [37] Choi, J., Oh, S., & Horowitz, R. (2009). Distributed learning and cooperative control for multi-agent systems. *Automatica*, 45(12), 2802-2814. doi: 10.1016/j.automatica.2009.09.025.
- [38] Choi, J., Oh, S., & Horowitz, R. (2009). Distributed learning and cooperative control for multi-agent systems. *Automatica*, 45(12), 2802-2814. doi: 10.1016/j.automatica.2009.09.025.
- [39] Chotai, A., P. C. Young, P. Davis, and Z. Chalabi. 1991. True digital control of glasshouse systems. *Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*. eds. Y. Hashimoto, and W. Day, 41-46. Oxford, UK: Pergamon Press.

- [40] Contribution à l'identification et la Commande Floue d'une Classe de Systèmes Non Linéaires, thèse de doctorat par Hamid Ouakka en 2009 , Université sidi Mohamed ben abdallâh , Laboratoire d'Electronique, Signaux-Systèmes et d'Informatique
- [41] Costa, P. 2007. A quantified approach to tomato plant growth status for greenhouse production in a semi arid climate. Ph.D, University of Arizona, Tucson, AZ.
- [42] Didi Faouzi , N. Bibi-Triki , B. Draoui , A. Abène, 2016 , Modeling, Simulation and Optimization of- agricultural greenhouse microclimate by the application of-artificial intelligence and/or fuzzy logic, International journal of scientific & engineering research, volume 7, issue 8, august-2016 issn 2229-5518.
- [43] Didi Faouzi , N. Bibi-Triki , B. Draoui , A. Abène, 2016 , Modeling and Simulation of Fuzzy Logic Controller for the purpose of Optimizing the Management Micro Climate of the Agricultural Greenhouse, MAYFEB Journal of Agricultural Science Vol 2 (2016).
- [44] Didi Faouzi , N. Bibi-Triki , B. Draoui , A. Abène, 2016 Comparison of modeling and simulation results management micro climate of the greenhouse by fuzzy logic between a wetland and arid region, International Journal of Multidisciplinary Research and Modern Education (IJMRME) ISSN (Online): 2454 - 6119, Volume II, Issue II, 2016 .
- [45] Didi Faouzi , N. Bibi-Triki , B. Draoui , A. Abène, 2017, Greenhouse Environmental Control Using Optimized, Modeled and Simulated Fuzzy Logic Controller Technique in MATLAB SIMULINK, Computer Technology and Application 7 (2016) 273-286, doi: 10.17265/1934-7332/2016.06.002.
- [46] Didi Faouzi , N. Bibi Triki and A. Chermitti, 2016. Optimizing the greenhouse micro-climate management by the introduction of artificial intelligence using fuzzy logic. Int. J. Computer Eng. Technology, 7: 78-92 , Volume 7, Issue 3, May-June 2016, pp. 78–92, Article ID: IJCET_07_03_007.
- [47] Dohmann, E. (1994).Fuzzy logic for a chemical bath. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, vol. 2, pp. 958-961.
- [48] Dubois, D. and Prade, H. (1984). Fuzzy logic and the generalized modus ponens revisited. Cybernetics systems, vol. 15, pp. 3-4.
- [49] E. Heuvelink (2005). «Tomatoes» Book 13 in Crop Production Science in Horticulture.CABI Publishing. Wageningen University
- [50] Eberhart, R., & Shi, Y. (2007). Computational intelligence: concepts to implementations. US: Morgan Kaufmann.
- [51] Edgar, T. F., Seborg, D. E., & Mellichamp, D. A. (2004). Process dynamics and control. Hoboken, N.J: Wiley.
- [52] Ehrlich, H., M. Kühne, and J. Jäkel. 1996. Development of a fuzzy control system for greenhouses. Acta Hort. (ISHS). 406.
- [53] El-Rabaie, N. M., and I. A. Abd-El-Hamid (2005). Fuzzy neural fault detection and isolation. In: Proceedings of the Seventh international Livestock Environment Symposium, ASAE, Beijing, China.
- [54] Engelbrecht, A. (2007). Computational intelligence: an introduction (Second Edition ed.): John Wiley & Sons, Ltd.
- [55] Environmental control for plants using intelligent control systems, Master of Science In Automatic Control Engineering , By Eng. Ibrahim Abdel Fattah Abdel hameed, B.

Sc. Automatic Control Engineering and Measurements Department, Faculty of Electronic Engineering, Menoufiya University, 2005.

[56] F. L. K. Kempkes, N. J. Van de Braak, J. C. Bakker (2000). «Effect of heating system position on vertical distribution of crop temperature and transpiration in greenhouse tomatoes» *Journal of Agricultural Engineering Research* n. 75

[57] Ferentinos, K. P. 2005. Biological engineering applications of feedforward neural networks designed and parameterized by genetic algorithms. *Neural Networks* 18: 934-950.

[58] Ferentinos, K. P., and L. D. Albright. 2002. Predictive neural network modeling of pH and electrical conductivity in deep-trough hydroponics. *Trans. ASAE* 45: 2007-2015.

[59] Ferentinos, K. P., K. G. Arvanitis, H. J. Tantau, and N. Sigrimis. 2006. Section 5.8 Special Aspects of IT for Greenhouse Cultivation, pp. 294-312 of Chapter 5 Precision Agriculture, in *CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information Technology*. Edited by CIGR--The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE. Copyright American Society of Agricultural Engineers.

[60] Ferreira, P. M., E. A. Faria, and A. E. Ruano. 2002. Neural network models in greenhouse air temperature prediction. *Neurocomputing* 43: 51-75.

[61] Fodil, M.S., Siarry, P., Guely, F. and Tyran, J.L. (2000). A fuzzy rule base for the improved control of pressurized water nuclear reactor. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 8, pp. 1-10.

[62] Frausto, H. U., and J. G. Pieters. 2004. Modelling greenhouse temperature using system identification by means of neural networks. *Neurocomputing* 56: 423-428.

[63] Frick, J., C. Precetti, and C. A. Mitchell. 1998. Predicting lettuce canopy photosynthesis with statistical and neural network models. *J. American Society for Horticultural Science* 123: 1076-1080.

[64] Fukami, S., Mizumoto, M. and Tanaka, K. (1980). Some considerations on fuzzy conditional inference. *Fuzzy Sets and Systems*, North-Holland, vol.4, pp. 243-273.

[65] G. P. A. Bot (1983). «Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model» PhD Thesis. Wageningen University

[66] G. Papadakis, D. Briassoulis, G. Scarascia Mugnozza, G. Vox, P. Feuilloy, J.A. Stoffers (2000). «Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials» Review paper published in *Journal of Agricultural Engineering Research* n. 77

[67] Gates, R. S., K. Chao, and N. Sigrimis. 2001. Identifying design parameters for fuzzy control of staged ventilation control systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 31: 61-74.

[68] Gates, R. S., L. W. Turner, and D. G. Overhults. 1992. A survey of environmental controllers. *Trans. ASAE* 35: 993-998.

[69] Gates, R.S., Chao, K. and Sigrimis, N.A. (1999). Fuzzy control simulation of plant and animal environment. An ASAE meeting presentation, Toronto, Canada, pp. 993- 1036.

[70] Gates, R.S., Chao, K. and Sigrimis, N.A. (1999). Fuzzy control simulation of plant and animal environment. An ASAE meeting presentation, Toronto, Canada, pp. 993- 1036.

[71] GDS Associates, Inc. (2010). «Best management practices guide: greenhouses & nurseries» Published by Massachusetts Farm Energy Program.

- [72] GE Lighting (2010). «Lighting for growth. Lamps and lighting for horticulture» Product Brochure available at www.gelighting.com/eu/
- [73] Glover, F. (1993). A user's guide to tabu search. *Annals of Operation Research*, vol. 41, pp. 3-28.
- [74] Goggos, V., and R. E. King. 2000. Qualitative-evolutionary design of greenhouse environment control agents. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 271- 282.
- [75] Goldberg, D.E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine
- [76] Gorrostieta-Hurtado Efreñ, Pedraza-Ortega Jesus Carlos, Aceves-Fernández Marco Antonio, Ramos-Arreguín Juan Manuel, Tovar-Arriaga Saúl, Sotomayor-Olmedo Artemio, "Greenhouse Fuzzy and Neuro-Fuzzy Modeling Techniques", pp. 309-322, www.intechopen.com.
- [77] H. F. De Zwart (1996). «Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model» PhD Thesis. Wageningen University. Hall.
- [78] Hashimoto, Y. 1997. Applications of artificial neural networks and genetic algorithms to agricultural systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 18: 71- 72.
- [79] Hashimoto, Y., H. Murase, T. Morimoto, and T. Torii. 2001. Intelligent systems for agriculture in Japan. *IEEE Control Systems Magazine* 21(5): 71-85.
- [80] Haykin, S. (1994). *Neural networks: A comprehensive foundation*. Macmillan, USA, ISBN 0-02-352761-7.
- [81] Heuvelink, E. 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Ann Bot.* 83: 413-422.
- [82] <http://www.wunderground.com/cgi-bin/findweather/getForecast?qery?>
- [83] Husmann, H. J., and H. J. Tantau. Integrated optimization of energy supply systems in horticulture using genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 31: 47-59.
- [84] I. Impron, S. Hemming, G. P. A. Bot (2008). «Effects of cover properties, ventilation rate, and crop leaf area on tropical greenhouse climate» Research paper published in *Biosystems Engineering* n. 99.
- [85] Iijima, T., Nakajima, Y. and Nishiwaki, Y. (1995). Application of fuzzy-logic controlsystem for reactor feed-water control. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 74, pp. 61-72.
- [86] J. C. Roy, T. Boulard, C. Kittas, S. Wang (2002). «Convective and ventilation transfers in greenhouses. Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank» Review paper published in *Biosystems Engineering* n. 83 .
- [87] J. J. Hanan (1998). «Greenhouses: advanced technology for protected horticulture» C.R.C Press
- [88] J. J. Prenger, P. P. Ling «Greenhouse condensation control - Keeping plants warm with thermal screens» (AEX-802-00) Ohio State University Fact Sheet
- [89] J. P. Holman (2010). «Heat transfer» 10th Edition. McGraw - Hill International Edition
- [90] J. W. Lund (1996). «Lectures on direct utilization of geothermal energy» The United Nations University - Geothermal Training Programme, Report number 1
- [91] J.A. Freeman, Fuzzy systems for control applications, *Math. J.* 4 (1994) 64–69.
- [92] J.-S. Roger Jang, "ANFIS: Adaptive--network-- based fuzzy inference systems," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, May/June, 1993. <http://citeseer.ist.psu.edu/jang93anfis.html>

- [93] Jamisson M.Hill, dynamic modeling of tree growth and energy use in a nursery greenhouse using MTLAB and Simulink , Cornell University , 7/31/2006.
- [94] Jensen, M.H. 2004.Steering your tomatoes towards profit. Greenhouse Crop Production and Engineering Design Short Course, Tucson, AZ, January 18-21, 2004. p. 3.
- [95] John Yen, Reza Langari, Fuzzy Logic Intelligence, Control and Information (Pearson Education, 2003).
- [96] Jones, J. W., E. Dayan, L. H. Allen, H. Vankeulen, and H. Challa. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). Trans. ASAE 34: 663-672.
- [97] Jones, P., J. W. Jones, L. H. Allen, and J. W. Mishoe. 1984. Dynamic computer control of closed environmental plant chambers: Design and verification. Trans. ASAE 27: 879-888.
- [98] Jong, de T. (1990): Natural ventilation of large multi- span greenhouse. PhD dissertation, Agricultural University of Wageningen. Obtained from: <http://www.library.wur.nl/WebQuery/clc/282224>.
- [99] Jorge Ierache, R. G.-M., Armando De Giusti. (2010). Learning by collaboration in intelligent autonomous systems. International Federation for Information Processing (IFIP) Advances in Information and Communication Technology (AICT), 331, 143-152.
- [100] K i n g P., Ma m d a n i E., The application of fuzzy control systems to industrial
- [101] K o v a c i _ Z., B o g d a n S., Fuzzy Controller Design. Theory and applications,
- [102] K. Popovski, N. Andritsos, M. Fytikas, B. Sanner, P. Ungemach, P. Valdimarsson (2010). «Direct application of geothermal energy» Chapter 7 in Geothermal Energy. PLM/GEOCOM/ISS Publication. Available at www.maga.con.mk
- [103] K. Rafferty (1998). «Greenhouses» Chapter 14 in Geothermal Direct Use Engineering and Design Guidebook, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology. Available at <http://geoheat.oit.edu/pdf/tp50.pdf>
- [104] Kamel Mesmoudi, Etude Expérimentale et Numérique de la Température et de l'Humidité de l'Air d'un Abri Serre Installé dans les Haut Plateaux d'Algérie, Région des Aurès , thèse de doctorat, présentée au Laboratoire de Physique Energétique Appliquée (LPEA) Pour obtenir le diplôme de Doctorat-en-Science, 09-12-2010, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA.
- [105] Kelly, I. D., & Keating, D. A. (1998). Faster learning of control parameters through sharing experiences of autonomous mobile robots. International Journal of Systems Science 29(7), 783-793.
- [106] Kelly, I. D., & Keating, D. A. (1998). Faster learning of control parameters through sharing experiences of autonomous mobile robots. International Journal of Systems Science 29(7), 783-793.
- [107] Khalifa, Y.M.A. (1997). Evolutionary methods for the design of electronic circuits and systems. University of Wales, Cardiff.
- [108] Kirkpatrick, A.S. (1983). Optimization by simulated annealing. Science, vol. 220, pp.671-680.
- [109] Kok, R., R. Lacroix, G. Clark, and E. Taillefer. 1994. Imitation of a procedural greenhouse model with an artificial neural-network. Canadian Agricultural Engineering 36: 117-126.

- [110] Koutb M., N. El-Rabaie, H. Awad, and I. A. Abd-El-Hamid (2004). Environmental control for plants using intelligent control systems. In: Preprints of the 5th IFAC/CIGR International Workshop on Artificial intelligence in Agriculture, Cairo, Egypt, pp. 101-106.
- [111] Koutb M., N. El-Rabaie, H. Awad, and I. A. Abd-El-Hamid (2004). Environmental control for plants using intelligent control systems. In: Preprints of the 5th IFAC/CIGR International Workshop on Artificial intelligence in Agriculture, Cairo, Egypt, pp. 101-106.
- [112] Kurata, K., and N. Eguchi. 1990. Machine learning of fuzzy rules for crop management in protected cultivation. *Trans. ASAE* 33: 1360-1368.
- [113] Kurpaska, S. (2006): Zapotrzebowanie na wodę pomidorów szklarniowych z uwzględnieniem sterowalnych czynników otaczającego klimatu. *Inżynieria Rolnicza*, 13(88), 261-269.
- [114] Kurpaska, S. (2007). *Szklarnie i tunele foliowe*. Poznań, PWRiL, ISBN 978-83-09-01024-1
- [115] Lafont, F. and J.-F. Balmat. 2002. Optimized fuzzy control of a greenhouse. *Fuzzy Sets and Systems*. 128: 47-59.
- [116] Larsen, P.M. (1980). Industrial applications of fuzzy logic control. *International journal of Man Mach. Studies*, vol. 22, pp. 3-10.
- learning. Addison-Wesley Publishing Co., USA.
- [117] Lee, C.-C. (1990). Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Part-I&II. *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics*, vol. 20, pp. 404-435.
- [118] Lees, M. J., M. J. Taylor, A. Chotai, P. C. Young, and Z. S. Chalabi. 1996. Design and implementation of a Proportional-Integral-Plus (PIP) control system for temperature, humidity and carbon dioxide in a glasshouse. *Acta Horticulturae* 406: 115-123.
- [119] Li, D. (1999). Fuzzy control using backward reasoning. Ph.D. Thesis, Intelligent Systems Laboratory, School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, UK.
- [120] Lin, Y.J. and Lee, T.S. (1993). An investigation of fuzzy logic control of flexible robots. *Robotics*, vol. 11, pp. 363-371.
- [121] Liu, D., & Wang, F.-Y. (2006). *Advances in computational intelligence*. New Jersey: World Scientific.
- [122] Ljung, L., *System Identification: Theory for the User*, Prentice - Hall, Englewood Cliffs NJ, 1987.
- [123] Lu, W., Zhang, Y., & Xie, Y. (2011, June 29 2011-July 1 2011). A multi-agent adaptive traffic signal control system using swarm intelligence and neuro-fuzzy reinforcement learning. Paper presented at the 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS), Vienna, Austria.
- [124] M. Guerbaoui, A. Ed-dahhak, Y. ElAfou1, A. Lachhab, L. Belkoura. Bouchikhi, "Implementation of Direct Fuzzy Controller in Greenhouse Based on Labview", *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Studies*, Vol.1, No.1, pp. 1-13, 2013.
- [125] M. S. Emeish (1999). «Geothermal heating system for Jordanian greenhouses» The United Nations University - Geothermal Training Programme, Report number 2
- [126] M.R. Emami et al., Fuzzy-logic control of dynamic systems: from modeling to design, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 13 (1) (2000) 47–69.
- [127] Makać, W.; Urbanek-Krzysztofiak, D. (2010): *Metody opisu statystycznego*. Gdańsk, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, ISBN: 83-7017-597-X.

- [128] Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 10-13.
- [129] Mamdani, E.H. (1974).Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. IEE*, vol. 121, pp. 1585-1588.
- [130] Marcelis, L. F. M., E. Heuvelink, and J. Goudriaan. 1997. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. *Sc. Horticulturae*, 83-104.
- [131] Marco Binotto (May 2014), "Greenhouse climate model an aid to estimate the influence of supplemental lighting on greenhouse climate " , School of Science and Engineering at Reykjavík University.
- [132] McArthur, S. D. J., Davidson, E. M., Catterson, V. M., Dimeas, A. L., Hatziargyriou, N. D., Ponci, F., & Funabashi, T. (2007). Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications-Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges. 22, 1743- 1752.doi: 10.1109/tpwrs.2007.908471.
- [133] Moore, C.G. (1991).Indirect adaptive fuzzy controllers. Ph.D. Thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, University of Southampton, UK.
- [134] Moore, C.G. and Harris, C.J. (1994).Indirect adaptive fuzzy control. In: "Advances in intelligent control," C.J. Harris, [Ed.], Tylor & Francis Ltd., London, pp. 227-304.
- [135] Morimoto, T., K. Hatou, and Y. Hashimoto. 1996. Intelligent control for plant production system. *Control Engineering Practice* 4: 773-784.
- [136] N. Bibi-Triki, Caractérisation et analyse du comportement thermo-énergétique d'une serre agricole Identification in situ des paramètres d'un modèle dynamique, thèse de doctorat science, université de Tlemcen.
- [137] Narendra, K. (2005). From feedback control to complexity management: a personal perspective. In R. Murray-Smith & R. Shorten (Eds.), *Switching and learning in feedback systems* (Vol. 3355, pp. 1-30): Springer Berlin Heidelberg.
- [138] Orkustofnun (National Energy Authority of Iceland) website: www.os.is (last accessed: 30 March 2011)
- [139] P. A. Saudagar, D. S. Dhote, D. R. Solanke, "Microcontroller based Intelligent Temperature Controller for Greenhouse", *International Journal of Engineering and Science*, Vol. 1, Issue 11, PP 40-44, 2012.
- [140] Pan Lanfang, Wang Wanliang, Wu Qidi, " Application of Adaptive Fuzzy Logic System to Model for Greenhouse Climate", *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation* June 28-July 2, 2000, Hefei, P.R. China, pp. 1687-1691.
- [141] Pasgianos, G.D., Arvanitis, K.G., Polycarpou P. and Sigrimis, N. (2003).A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 40, pp. 153-177.
- [142] Pedrycz, W. (1993).Fuzzy control and fuzzy systems. John Wiley & Sons Inc., Taunton, New York.
- [143] Phelan, R. M. 1977.*Automatic Control Systems*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Piegat, A. 2001.*Fuzzy modeling and control*. Physica-Verlag, Heidelberg ; New York.
- [144] Polya, G. (1957). How to solve it: a new aspect of mathematical method. 2nd edn., Princeton, N. J., Princeton University Press.
- processes, *Automation* vol. 13, No. 3, 1977.

- [145] R. Caponetto, L. Fortuna, G. Nunnari and L. Occhipinti, A Fuzzy Approach to Greenhouse Climate Control, Proceedings of the American Control Conference Philadelphia, Pennsylvania, June 1998, pp1866-1870.
- [146] R. Caponetto, L. Fortuna, G. Nunnari and L. Occhipinti, A Fuzzy Approach to Greenhouse Climate Control, Proceedings of the American Control Conference Philadelphia, Pennsylvania, June 1998, pp1866-1870.
- [147] R. J. C. von Ooteghem (2007). «Optimal control design for a solar greenhouse» PhD Thesis. Wageningen University
- [148] Raczek, A. (2012). Modelowanie klimatu szklarni. Materiały IX Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki Wydziału Mechanicznego oraz V Ogólnopolskiej Konferencji Studenckich Kół Naukowych Uczelni Technicznych, Koszalin, ISBN 978-83-7365-297-2, 151-160.
- [149] Reeves, C.R. (1996). Modern heuristic techniques. Chap. 1 in “Modern heuristic search methods”, Book, John Wiley & Sons Ltd.
- [144] Rojas, I., Pomares, H., Ortega, J. and Prieto, A. (2000). Self-organized fuzzy system generation from training examples. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 8, pp. 23-36.
- [150] Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review, vol. 65, pp. 386-408.
- [150] Ruano, A. (2005). Intelligent control systems using computational intelligence techniques. London: Institution of Electrical Engineers.
- [151] Rutkowski, L. (2008). Computational intelligence: methods and techniques. Berlin: Springer.
- [152] Saade, J.J. (1996). A unifying approach to defuzzification and comparison of the outputs of fuzzy controllers. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 4, pp. 227- 237.
- [153] Saeed, B.I. & Mehrdadi, B., (2011). Zero overshoot and fast transient response using a fuzzy logic controller. In 17th International Conference on Automation and Computing (ICAC), University of Huddersfield, UK. Conference Proceedings. 116 – 120 Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6084912&isnumber=6084889>
- [154] Saeed, B.I. & Mehrdadi, B., (2012). Design of an iterative auto-tuning algorithm for a fuzzy PID controller. In 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering (COMADEM), University of Huddersfield, UK. Journal of Physics: Conference Series, Volume (364) 012052 Retrieved from <http://iopscience.iop.org/1742-6596/364/1/012052>.
- [155] Saeed, Bakhtiar I. (2014) Design of a wireless intelligent fuzzy controller network. Doctoral thesis, University of Huddersfield. This version is available at <http://eprints.hud.ac.uk/24569/>
- [156] Salgado, P., J. B. Cunha, and C. Couto. 1998. A fuzzy identification and controller for the agricultural greenhouse. 7th International Conference on Computers in Agriculture. St. Joseph, MI: ASAE.
- [157] Salgado, P. and J.B. Cunha. 2005. Greenhouse climate hierarchical fuzzy modeling. Control Engineering Practice. 13: 613-628.
- [158] Schöllig, A., Alonso-Mora, J., & D’Andrea, R. (2010, 15-17 Dec. 2010). Independent vs. joint estimation in multi-agent iterative learning control. Paper presented at the 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC).

- [159] Seginer, I. 1997. Some artificial neural network applications to greenhouse environmental control. *Computers and Electronics in Agriculture* 18: 167-186.
- [160] Seginer, I., T. Boulard, and B. J. Bailey. 1994. Neural network models of the greenhouse climate. *J. Agricultural Engineering Research* 59: 203-216.
- [161] Setiawan, A. (1998). Applying pseudo-derivative-feedback algorithm to greenhouse temperature control. M.S. Thesis, Cornell University, USA.
- [162] Setiawan, A., Albright, L.D. and Phelan, R.M. (1998). Simulation of greenhouse air temperature control using PI and PDF algorithms. *IFAC*.
- [163] Setiawan, A., L. D. Albright, and R. M. Phelan. 2000. Application of pseudo derivative-feedback algorithm in greenhouse air temperature control. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 283-302.
- [164] Shin, Y., & Xu, C. (2009). *Intelligent systems: modeling, optimization, and control*: CRC Press. Taylor & Francis Group.
- [165] Sigrimis, N., K. G. Arvanitis, and G. D. Pasgianos. 2000. Synergism of high and low level systems for the efficient management of greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture* 29: 21-39.
- [166] Sigrimis, N., K. G. Arvanitis, G. D. Pasgianos, and K. P. Ferentinos. 2002. Computer integrated management and intelligent control of greenhouses. *Environment Control in Biology* 40(1): 39-53.
- [167] Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable feedback control: analysis and design*. Chichester: John Wiley.
- [168] Smith, O. J. M. 1957. Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress* 53: 217.
- [169] T. Boulard, A. Baille (1995). «Modeling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents» *Journal of Agricultural Engineering Research* n. 61
- [170] T. Boulard, C. Kittas, J. C. Roy, S. Wang (2002). «Convective and ventilation transfers in greenhouses. Part 2: determination of the distributed greenhouse climate» Review paper published in *Biosystems Engineering* n. 83
- [171] T. G. Salazar (2010). «An estimate of greenhouse transpiration, condensation and natural ventilation fluxes» Thesis Farm Technology. Wageningen University.
- [172] Takagi, T. and Sugeno, M. (1983). Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions. In *Proc. IFAC Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis*, pp. 55-60.
- [173] Tan, V., Yoo, D.-S., & Yi, M.-J. (2008a). A Multiagent-System Framework for Hierarchical Control and Monitoring of Complex Process Control Systems. Paper presented at the Proceedings of the 11th Pacific Rim International Conference on Multi-Agents: Intelligent Agents and Multi-Agent Systems, Hanoi, Vietnam.
- [174] Tap, F. (2000). Economics-based Optimal Control of Greenhouse Tomato Crop Production, Thesis Wageningen Agricultural University. ISBN 9058082369. Obtained from: <http://www.library.wur.nl/WebQuery/clc/971399>. Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [175] Taylor, C.J., Leigh P., Price L., Young P.C., Vranken, E. and Berckmans, D. (2004). Proportional-integral-plus (PIP) control of ventilation rate in agricultural buildings. *Control Engineering Practice*, vol. 12, pp. 225–233.

- [176] Tilley, D., D. Ogle, and L. St. John. 2010. Plant guide for Douglas' dusty maiden (*Chaenactis douglasii*). USDA-Natural Resources Conservation Service, Idaho Plant Materials Center. Aberdeen, ID. 83210.
- [177] TRNSYS Documentation. Type 501: ground temperature profile.
- [178] Tseng, H.C. and Teo, D.W. (1998). Ship mounted satellite tracking antenna with fuzzy logic control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, pp. 639-645.
- [179] V.P. Sethi, S.K. Sharma (2007). «Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications» *Solar Energy* n. 81.
- [180] Visioli, A. (2006). *Practical PID control*. London: Springer.
- [181] Volk, T., B. Bugbee, and R. M. Wheeler. 1995. An approach to crop modeling with the energy cascade. *Life Support and Biosphere Sci.* 1: 119-127.
- [182] W. F. F. Ilahi (2009). «Evapotranspiration models in greenhouse» M.Sc. Thesis. Wageningen University
- [183] Wachowicz, E. (2006). Lingwistyczny model procesów zachodzących w szklarni. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 527-536.
- [184] Wang, P. and Kwok, D.P. (1992). Auto-tuning of classical PID controllers using an advanced genetic algorithm. *IECON '92*, vol. 3, pp. 1224-1229.
- [185] Yamakawat, T. (1993). A fuzzy inference engine in non-linear analogue model and its application to a fuzzy logic control. *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 4, pp. 497-524.
- [186] Yen, J. and R. Langari. 1999. *Fuzzy logic, intelligence, control, and information*. Prentice
- [187] Young, P. C., M. J. Lees, A. Chotai, W. Tych, and Z. S. Chalabi. 1994. Modelling and PIP control of a glasshouse microclimate. *Control Engineering Practice* 2: 591-604.
- [188] Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353.
- [189] Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353.
- [190] Zadeh, L.A. (1973). Outline of a new approach to the analysis complex systems and decision processes. *IEEE Transactions Systems, Man, Cybernetics*, vol. SMC-3, pp. 28-44.
- [191] ZHOU Xiaobo, WANG Chengdun and LAN Hong, The Research and PLC Application of Fuzzy Control in Greenhouse Environment, 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp340-344.
- [192] ZHOU Xiaobo, WANG Chengdun and LAN Hong, The Research and PLC Application of Fuzzy Control in Greenhouse Environment, 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp340-344.
- [193] Zilouchian, A., & Jamshidi, M. (2001). *Intelligent control systems using soft computing methodologies*: CRC Press, Inc.
- [194] Zwart, de H.F. (1996). Analyzing energy saving options in greenhouse cultivation using simulation model. Ph.D. dissertation, Agricultural University of Wageningen, ISBN 90-5485-533-9. Obtained from: <http://www.library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/32454>.

RESUMÉ

L'évolution socio-économique des populations a connu ces dernières décennies un développement rapide et des changements multiples, notamment dans nos habitudes alimentaires qui ont été caractérisées par la consommation des produits agricoles frais, hors saisons et largement disponible tout au long de l'année.

La culture sous-abris des fruits, légumes et espèces florales s'est développée depuis la serre classique jusqu'à la serre agro-industrielle qui est actuellement connue par sa modernité et son niveau élevé d'automatisation (système de chauffage, de brumisation, de climatisation, de contrôle, de régulation et de commande, ordinateur de supervision etc...).

Des nouvelles techniques ont émergées, parmi lesquelles l'utilisation d'appareils de contrôle et de régulation des variables climatiques dans la serre (température, humidité, concentration en CO₂ etc...). En outre l'exploitation de l'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones et ou /logique floue.

Actuellement l'ordinateur climatique offre des multiples prestations et permet de résoudre les problèmes relatifs à la régulation, au contrôle et aux commandes.

Les serristes restent vigilants et attentifs, pour suivre ce développement technologique. ils veillent à la compétitivité et optimisent leurs investissements/production, dont le coût ne cesse de croître.

La motivation principale dans le choix d'une commande par l'intelligence artificielle, est d'améliorer les performances de la gestion climatique interne, de tendre vers une stratégie de contrôle-commande pour aboutir à une structure de calcul homogène à travers un modèle mathématique du procédé à commander, exploitable d'une part pour la synthèse du contrôleur et d'autre part par la simulation des performances du système. C'est à partir de cet état de fait, que nous avons engagé notre travail de recherche dans ce domaine et modéliser un contrôleur intelligent par l'utilisation de la logique floue et procéder à une simulation sur la base des données météorologiques de l'année 2015 (Dar el Beida Alger et Biskra) à travers MATLAB Simulink, pour permettre le pilotage climatique et la gestion optimale de microclimat de la serre.

Mots clés : Modèle Simulink de serre agricole, Modèle de bilan énergétique/massique, La logique floue, Micro climat, Simulation, Modélisation.

SUMMARY

The socio-economic evolution of populations has undergone rapid development and changes in recent decades, notably in our eating habits which have been characterized by the consumption of fresh agricultural products, excluding seasons and widely available throughout the year.

The sub-shelter culture of fruits, vegetables and floral species has developed from the classical greenhouse to the agro-industrial greenhouse which is currently known for its modernity and high level of automation (heating, misting, Air conditioning, control, regulation and control, computer supervision, etc.).

New technologies have emerged, including the use of climate control devices in the greenhouse (temperature, humidity, CO₂ concentration, etc.). In addition, the use of artificial intelligence As neural networks and / or fuzzy logic.

Today, the climate computer offers multiple services and solves problems related to regulation, control and controls.

Serrists remain vigilant and attentive to follow this technological development. They ensure competitiveness and optimize their investment / production, the cost of which is constantly increasing.

The main motivation in the choice of a command by artificial intelligence is to improve the performance of internal climate management, to tend towards a control - command strategy to arrive at a homogeneous calculation structure through a mathematical model Of the method to be controlled, which can be used on the one hand for synthesizing the controller and on the other hand for simulating the performance of the system. It is from this state of affairs that we engage our research work in this field and model an intelligent controller by the use of fuzzy logic and carry out a simulation based on the meteorological data of the year 2015 (Dar el Beida Algiers and Biskra) through MATLAB Simulink, to enable climate control and optimal management of the greenhouse microclimate.

Keys words: Simulink model of agricultural greenhouse, Energy / mass balance model, Fuzzy logic, Micro climate, Simulation, Modeling.

ملخص

لقد عرف النمو الاجتماعي الاقتصادي للشعوب في السنوات الأخيرة تطورا سريعا وتغيرات متضاعفة ونخص بالذكر العادات الغذائية التي كانت تمتاز باستهلاك المنتجات الفلاحية الطبيعية خارج المواسم وتطورها بشكل واسع على مدار السنة.

إن الإنتاج المحمي " البيوت الكلاسيكية " للفواكه والخضر والمنتوجات الزهرية تطور كذلك انطلاقا من المحميات الكلاسيكية وصولا إلى المحميات الفلاحية الصناعية المعروفة حاليا بمستوى تطورها العالي للتشغيل الآلي (نظام التدفئة، التبريد، المراقبة... الخ).

لقد ظهرت تقنيات جديدة مؤخرًا أدمجت في هذا المجال بما في ذلك استخدام أجهزة التحكم وتنظيم التغيرات المناخية داخل المحميات الزراعية (درجة الحرارة، الرطوبة وتركيز CO₂... الخ), إضافة إلى استخدام الذكاء الاصطناعي والمتمثل في الشبكات العصبية و/ أو المنطق الضبابي.

إن الكمبيوتر المناخي حاليا يقدم فوائد ومكاسب متعددة ويعالج ويحل المشاكل المتعلقة بالتعديل والمراقبة والضيبط. و يبقى الباحثون في هذا المجال والمستخدمون لتقنية المحميات الزراعية متيقظين ومتابعين عن كثب لهذا التطور التكنولوجي وذلك لضمان القدرة على المنافسة وتحقيق أقصى استفادة من الاستثمارات/ الإنتاج بتكاليف أقل.

إن الدافع الرئيسي في اختيار الذكاء الاصطناعي هو تحسين أداء إدارة المناخ الداخلي للمحميات, والسعي إلى إستراتيجية للتحكم والمراقبة لتحقيق بنية حساب متجانسة من خلال نموذج رياضي لطريقة وأساليب التحكم. بحيث تكون قابلة للاستغلال من أجل تركيب وحدة التحكم من جهة, ولحاكاة أداء النظام من جهة أخرى, و انطلاقا من هذه المعطيات قمنا بعمل مشروع بحثنا في هذا المجال وذلك نمذجة وحدة تحكم ذكية باستخدام المنطق الضبابي و محاكاتها باستعمال قاعدة بيانات الأرصاد الجوية لمنطقتي (دار البيضاء الجزائر و بسكرة) لسنة 2015, من خلال برنامج الماتلاب للسيطرة لأجل التسيير و المراقبة المثلى للمناخ داخل الدفيئات الحرارية.

و يبقى الباحثون في هذا المجال والمستخدمون لتقنية المحميات الزراعية متيقظين ومتابعين عن كثب لهذا التطور التكنولوجي وذلك لضمان القدرة على المنافسة وتحقيق أقصى استفادة من الاستثمارات/ الإنتاج بتكاليف أقل.

الكلمات الرئيسية : نموذج الدفيئة الزراعية, نموذج توازن الكتلة/الطاقة, المنطق الضبابي, عناصر المناخ, المحاكاة, النمذجة.