

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar –
Annaba
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية التكنولوجيا

Département Electronique

قسم الإلكترونيك

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat Troisième Cycle

Filière : Electronique

Spécialité : Automatique et Signaux

Par :

Charaf Eddine Lachouri

Thème :

Automatisation et conduite de serres (fleurs et légumes)

Devant les jurés :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Abbassi H. Ahmed	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	Mansouri Khaled	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	Amara Fethi	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Co-rapporteur
04	Moussaoui Abdelkrim	Prof.	Université 8 Mai 1945 - Guelma	Examineur
05	Belmeguenai Aissa	Prof.	Université 20 Aout 1955 - Skikda	Examineur
06	Fares Bourriachi	MCA	Université Houari Boumediène - Alger	Examineur

ملخص :

إن الهدف الرئيسي من الزراعة في البيوت البلاستيكية هو الوصول إلى أكبر مردود مالي ممكن للفلاحين و هذا بتحقيق توازن بين تحسين نوعية الإنتاج و كميته و المصاريف اللازمة لإيجاد الجو المناسب لنمو النبتة.

إن النبتة عند نموها تتأثر بالجو المحيط بها و بالماء و الأملاح المعدنية.

البيت البلاستيكي هو مكان مغلق يسهل فيه التحكم في الجو و الماء و الأملاح المعدنية. هذا البحث يتكون من أربعة أجزاء،

الجزء الأول مخصص لدراسة شاملة على التسيير الآلي للبيت البلاستيكي.

الجزء الثاني مخصص لعرض نموذج المعرفة لنمو النبتة؛ حالة الطماطم.

الجزء الثالث مخصص لعرض طريقة عامة تعتمد على مبادئ المنطق الغامض و الشبكة العصبية الاصطناعية لتكوين نموذج البيئة الداخلية للبيت البلاستيكي و هذا التطبيق يعرض لأول مرة (تطبيق لهذه الطريقة العامة التي تعتمد على مبادئ المنطق الغامض و الشبكة العصبية الاصطناعية لتكوين نموذج البيئة الداخلية للبيت البلاستيكي باستعمال معطيات حقيقية).

الجزء الرابع مخصص لترسيخ نموذج التحكم في البيئة الداخلية للبيت البلاستيكي الذي يعتمد على مبادئ المنطق الغامض و الشبكة العصبية الاصطناعية على بطاقة مصفوفات البوابات المنطقية القابلة للبرمجة في الميدان.

المفاتيح: البيت البلاستيكي، النموذج، النبتة، التحكم في البيئة، الذكاء الاصطناعي، المنطق الغامض، الشبكة العصبية، شبكة الأعصاب الغامض، مصفوفات البوابات المنطقية القابلة للبرمجة في الميدان.

Résumé :

L'objectif principal de la production végétale sous serre est d'optimiser les revenus financiers des agriculteurs, ceci est réalisé en trouvant un juste équilibre entre l'optimisation de la qualité et de la quantité des produits issus de l'horticulture et la maîtrise des coûts financiers indispensable pour obtenir les conditions climatiques spécifiques requises pour favoriser la croissance de la plante.

La croissance de la plante est principalement déterminée par les facteurs climatiques environnementaux, le niveau d'humidité et l'apport en engrais.

Tandis que la serre représente un environnement clos où les paramètres climatiques et l'irrigation fertilisante sont sous contrôle.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres,

Le premier chapitre (I) est réservé à la présentation d'une serre dans le cadre générale d'une gestion automatisée.

Le deuxième chapitre (II) est réservé à la présentation d'un modèle de connaissance de la croissance de la plante (cas de la tomate)

Le troisième chapitre (III) est réservé à la présentation d'un outil générique basé sur les concepts de la logique floue et les réseaux de neurones pour contrôler le comportement interne de la serre. Il constitue l'essence même de notre travail : l'application de cet outil générique pour contrôler le comportement de l'environnement interne d'une serre basée sur des données réelles.

Le quatrième chapitre (IV) est réservé à la présentation d'une implémentation d'un contrôleur neuro-flou sur une carte FPGA.

Mots clé : serre, modélisation, conduite climatique, intelligence artificielle, logique floue, les réseaux de neurones, neuro-flou, VHDL, FPGA.

Abstract :

The primary goal of greenhouse crop production is to enhance the economic returns for the cultivator by striking a balance between enhancing the quantity and quality of horticultural products and managing the costs associated with achieving optimal climatic conditions.

The growth of crops is primarily impacted by environmental climatic factors in the surroundings, as well as the quantity of water and fertilizers provided – variables that can be managed to facilitate optimal growth and development of the crop. This is why a greenhouse is an ideal setting for cultivation, as it establishes a controlled environment where climatic and fertilizer irrigation variables can be precisely regulated.

In this thesis,

The chapter one (I) deal with presentation of general framework for greenhouse automating management.

The chapter two (II) deal with presentation of knowledge model of the growth plant (case of tomato).

The chapter three (III) deal with the presentation of a generic tool based on the concepts of fuzzy logic and neuronal networks for controlling the behavior of a greenhouse. It constitutes the essence of our work : the use of this generic methodology for controlling the internal behavior of greenhouse based on real data.

The chapter four (IV) deal with the presentation of FPGA implementation of neuro-fuzzy controller for controlling the greenhouse climate.

Key words : greenhouse, plant, modeling, climatic control, artificial intelligence, fuzzy logic, network, neuro-fuzzy, FPGA, VHDL.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude au monsieur MANSOURI, maitre de conférence à l'université d'Annaba, mon directeur de thèse, pour avoir dirigé mon travail. C'est grâce à sa grande disponibilité, ses conseils judicieux sur différents points relatif à mon projet, que j'ai pu mener à bien ce travail.

Mes respectueux remerciements et ma profonde reconnaissance à monsieur LAFIFI, maitre de conférence a l'université d'Annaba, mon coencadreur, pour avoir dirigé mon travail.

Mes remerciements s'adresse aussi à monsieur ABBASSI, Professeur à l'université d'Annaba pour l'honneur qu'il ma fait en président le jury.

Je remercie respectueusement monsieur LACHOURI maitre de conférence à l'université de Skikda et monsieur MOUSSAOUI, maitre de conférence à l'université de Guelma, qui ont accepté d'examiner ce travail.

Mes respectueux remerciements vont à monsieur SAHOUR, Docteur à l'université de Khanchla, pour son aide et collaboration.

Je remercie chaleureusement mes chers parents, ma chère femme et mes frères.

Je remercie mes collègues et mes amis pour leur soutien moral.

Et dans le souci de n'oublier personne, que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, trouvent ici l'expression de ma gratitude et mes respects les plus profondes.

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

CHAPITRE 1

Généralités sur les serres agricoles

Introduction	3
1.1 Description de la serre et de son micro climat.....	4
1.1.1 Les structures de serres en forme de tunnels	4
1.1.2 Les structures de serres pour la culture horticole	4
1.1.3 Éléments constitutifs d'une structure de serre	5
1.1.4 Les matériaux utilisés pour la couverture ou l'enveloppe.	7
1.1.5 Les diverses catégories de structures de serre	10
1.1.6 Le microclimat à l'intérieur de la serre	12
1.2. Problématique de la gestion des serres.....	17
1.3. Contrôle du climat sous serre.....	18
1.3.1 Généralité sur la régulation sous serre.....	18
1.3.2. Données employées par le mécanisme de contrôle	19
1.3.3. Surveillances réalisées par le mécanisme de régulation de la serre	20
1.3.4. Evolution de La mission des contrôleurs de serre de la régulation.....	21
1.3.4.1. Qu'est-ce qui est contrôlé par un système automatisé.....	22
1.3.4.2. Le contrôle automatisé.....	22

CHAPITRE 2

Modélisation de la croissance de la plante (tomate)

Introduction.....	24
2.1 Exigence climatique.....	24

2.1.1	Température.....	24
2.1.2	Humidité.....	26
2.2	La modélisation biologique.....	26
2.2.1	Hypothèse concerne le modèle.....	26
2.2.2	Elément de calcul de la courbe de rendement.....	26
2.2.2.1	La photosynthèse nette (N) à l'instant i.....	27
2.2.2.2	La respiration nocturne.....	28
2.2.2.3	Repérage des stades de développement.....	29
2.2.2.4	Efficacité de l'assimilation chlorophyllienne.....	29
2.2.2.5	Influence du taux de recouvrement.....	30
2.2.2.6	Floraison-nouaison, Taux de grossissement.....	31
2.2.3	Association des différents éléments de calcul.....	32
2.2.4	Recherche de la valeur des paramètres	32
2.2.5	Organigramme.....	34
2.3	Résultats et discussion.....	35

CHAPITRE 3

Modélisation et commande neuro-flou d'une serre Agricole

	Introduction.....	37
3.1	Les réseaux neuro-floue.....	37
3.1.1	Rappel sur les méthodes connexionnistes.....	38
3.1.1.1	Les réseaux de neurones.....	38
3.1.1.2	Les fonctions d'un réseau de neurone.....	38
3.1.1.3	Apprentissage d'un réseau de neurone.....	39

3.1.1.4. Algorithme de rétro-propagation du gradient.....	40
3.2. Architecture du système d'inférence neuro-floue adaptative (ANFIS).....	42
3.3. Algorithme de moindre carré.....	44
3.4. Apprentissage d'un réseau neuro-floue.....	45
3.4.1. Algorithme d'apprentissage hybride	45
3.5. Contrôle neuro-floue.....	46
3.5.1. Commande par apprentissage direct.....	46
3.5.2. Commande par modèle inverse neuro-flou.....	47
3.5.2.1 Phase d'apprentissage.....	47
3.5.2.2. Phase d'utilisation.....	48
3.6. Contrôle de l'environnement interne de la serre.....	48
3.6.1. Bilan climatique d'une serre horticole.....	49
3.6.1.1. Modèle de connaissance.....	49
3.6.2 Approches neuronales appliquées aux systèmes flous	50
3.6.2.1. Modèle comportemental	50
3.6.2.2. Systèmes d'inférence neuro-flou adaptatifs.....	50
3.6.2.3. ANFIS Modélisation, Apprentissage et Test.....	54
3.7. Les resultats	55
3.7.1. Les fichiers de mesure.....	55
3.7.2. Évaluation du modèle en utilisant les données de validation et de test	57
3.7.3. Discussion des résultats.....	57

CHAPITRE 4

Implémentation d'un contrôleur neuro-flou sur une carte FPGA

4. Les PLCs (Programmable Logic Controller)	64
4.1 Introduction.....	64
4.2 Description des PLDs (Programmable Logic Device).....	65
4.3 Architecture fondamentale d'un PLD	65
4.4 Les Catégories de PLDs.....	67
4.4.1 Les Programmable Array Logique (PALs)	67
4.4.2. Les Generique Array Logic (GALs).....	69
4.4.3 Les Erasable Programmable Logique Devices (EPLDs).....	70
4.4.4. Les Complex Programmable Logic Devices (CPLDs)	71
4.4.5 Les FPGAs	71
4.5 Exploration des FPGA	72
4.5.1 Introduction et notions générales sur les FPGA.	72
4.5.1.1 Interconnexions d'entrées/Sorties (I/O interfaces).....	73
4.5.1.2 Les BLBB (Basic Logic Building Blocks).....	75
4.5.1.3 Les Interconnexions.....	77
4.6. Les langages de description matérielle HDL	79
4.6.1. Évolution des HDL.....	79
4.6.2 Utilité des HDL.....	81
4.6.3 Illustrations de langages de description matérielle (HDL)	81
4.7. VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language).....	82
4.7.1. Verilog.....	82
4.7.2. Comparaison et Sélection entre VHDL et Verilog	82
4.7.3. Le VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language).....	83
4.8.1 Composition d'un programme VHDL comprenant l'entité et l'architecture	84
4.8.2 Composants du langage VHDL	86
4.8.3 Disposition d'un programme en VHDL	88

4.8.4. Les TESTBENCHS.....	89
4.9. Implémentation d'un contrôleur ANFIS sur FPGA.....	89
4.9.1. Contrôleur neuro floue du climat interne de la serre.....	92
4.9.2. Conception et Implémentation.....	94
4.9.3. Resultat et Discussion.....	96
Conclusion générale.....	100
Bibliographies.....	103
Annexes	107
Annexe A.....	107
Annexe B.....	109
Annexe C.....	114
Articles publiés dans des revues à comité de lecture	114
Conférences internationales à comité de lecture	113

Liste des figures

Fig. 1.1. Serre tunnel

Fig. 1.2a. Disposition d'une serre horticole composée de deux chapelles et de trois modules chacune.

Fig. 1.2b. Architecture d'une serre conventionnelle.

Fig. 1.3. Structure de serres multi chapelles

Fig. 1.4. Serre doubles chapelles

Fig. 1.5. Serre tunnel

Fig. 1.6. Serre de reproduction

Fig. 1.7. Classification des serres agricoles

Fig. 1.8 : Serre Horticole

Fig. 1.9 : serre Florale

Fig. 1.10. Ventilation par un seul coté

Fig. 1.11. Ventilation par deux cotés

Fig. 1.12. Les méthodes de ventilation latérale pour les serres

Fig. 1.13. Le système du climat d'une serre

Fig. 2.1 Courbes d'efficacité de la photosynthèse potentielle en fonction de l'énergie lumineuse I et de la teneur en CO₂ de l'air

Fig. 2.2. Evolution de la respiration en fonction de la température

Fig. 2.3. Organigramme du modèle de la croissance de la plante

Fig. 2.4. Evolution du rendement de la plante en fonction du temps

Fig.3.1. Modèle neuro-floue

Fig.3.2. le neurone formel

Fig. 3.3. (a) modèle floue de première ordre de Sugéno avec 2-entrées et 2- règles,
(b) architecture de ANFIS équivalent

Fig. 3.4. Autre architecture de ANFIS équivalente à un modèle flou de premier ordre de Sugéno avec 2-entrées et 2-règles

Fig. 3.5. Identification des paramètres du contrôleur

Fig. 3.6. Phase d'utilisation du contrôleur

Fig. 3.7. Structure du model ANFIS de la serre

Fig. 3.8. Architecture de règles floues de la fonction d'appartenance trapézoïdale

Fig. 3.9. Flowchart pour l'estimation de climat interne de la serre

Fig. 3.10. Diminution de l'erreur pendant le processus de test pour la configuration ANFIS avec triangulaire M_f et gaussien M_f

Fig. 3.11. Le climat interne de le serre

Fig. 3.12.a. Données mesurées de chauffage d'apprentissage

Fig. 3.12.b. Données mesurées de chauffage de validation

Fig. 3.12.c. Données mesurées de chauffage de teste

Fig. 3.13.a. Comparaison entre les valeurs réelles et calculées de chauffage de teste (Erreur = 1.2653)

Fig. 3.13.b : Comparaison entre les valeurs réelles et calculées de chauffage d'apprentissage (Erreur = 1.2561e-005)

Fig. 3.13.c. Comparaison entre les valeurs réelles et calculées de chauffage de validation (Erreur = 1.4365)

Fig. 3.13.d : Les règles floues de la commande de chauffage

Fig. 3.13.e : La surface de la sortie réelle de chauffage

Fig. 3.13.f : l'erreur de prédiction du chauffage (1.8235e -004)

Fig. 3.14.a : Données mesurées de ventilation d'apprentissage

Fig. 3.14.b : comparaison entre les valeurs réelles et calculées de ventilation

Fig. 3.14.c : l'erreur de prédiction de ventilation (3.5471e004)

Fig. 3.14.d : Les règles floues de la commande de ventilation

Fig. 3.14.e : La surface de la sortie réelle de chauffage

Fig. 3.15. Comparaison entre les données mesurées et désirées pour le climat interne de la serre

- Fig. 4.1 : Cellules logiques interconnectées.
- Fig. 4.2. Unité fondamentale d'un PAL (structure combinatoire).
- Fig. 4.3. Architecture global d'un CPLD.
- Fig. 4.4. Fondement conceptuel architectural des FPGAS [GIN10][TAV96].
- Fig. 4.5. Configuration interne d'IOE de la série Cyclone II [ALT11].
- Fig. 4.6 : structure simplifiée d'un IOB [XIL11].
- Fig. 4.7. Composition interne d'un ALM Adaptive Logic Module [ALT11].
- Fig. 4.8. Configuration d'un bloc logique configurable (CLB) et agencement des tranches (série Virtex) [XIL11].
- Fig. 4.9. Hiérarchie des séries Altera, comprenant Stratix haut de gamme et haute densité, Arria moyenne gamme, ainsi que Cyclone à faible coût et consommation électrique réduite.
- Fig. 4.10. Visualisation des diverses formes d'interconnexions chez Xilinx.
- Fig. 4.11. Architecture fondamentale d'un module en VHDL [WIL11].
- Fig. 4.12. Structure déclarative de l'entité.
- Fig. 4.13. Structure déclarative de l'architecture.
- Fig. 4.14. Structure d'un programme sous VHDL [GIN10].
- Fig. 4.15. Le modèle global de la serre
- Fig. 4.16. Fonction d'appartenance de la température interne
- Fig. 4.17. Le contrôleur neuro-flou
- Fig. 4.18. Le démultiplexeur
- Fig. 4.19. The fuzzier module
- Fig. 4.20. Le module de commande
- Fig. 4.21. Controleur neuro-flou, simulation Quartus II
- Fig. 4.22. Schématiques RTL de contrôleur neuro-flou

Liste des symboles

a_c	Coefficient spécifique relative au couvert ($m^2.j^{-1}.C^0$)
a_f	Coefficient spécifique relative aux fruits
A_j	Indice d'activité du couvert (sans dimension)
C_0	Point de compensation pour le CO ₂ ($Kg.m^{-3}$)
C_i	Concentration de l'aire en CO ₂ ($Kg.m^{-3}$)
D_j	Indice de développement ou âge physiologique de la plante (sans dimension)
H_j	Photopériode (s)
I_i	Rayonnement solaire photo synthétiquement actif (Wm)
J	Durée nyctémère (86400 s)
K_j, K_{max}	Taux de convertir du sol, réel et maximal (sans dimension)
K_{fj}, K_{fmax}	Taux de grossissement des fruits, réel et maximal (sans dimension)
c	Le nombre de classes
m	Le poids d'exposant
B_{ij}	Degré d'appartenance de la donnée X_j à la classe i
S_B	Matrice de dispersion flou-inter-classe
S_w	Matrice de dispersion flou-intra-classe
q	Le paramètre de l'opérateur de t-norme pour la liaison d'antécédent de règle
p	Le paramètre de l'opérateur de t-norme et de t-conorme pour le règle d'agrégation et le règle d'implication
β	Le paramètre de compromis de deux approches d'inférence
α	Le paramètre de défuzzification
N	Le nombre de données
v_i	Le centre de la classe i
\bar{v}	Le vecteur moyen flou total
π_j	L'effet global du x_j sur le système

τ_{ij}	Est la gamme dans laquelle la fonction d'appartenance $B_{ij}(x_j)$
τ_j	Est la gamme entière de la variable x_j
R_g	Rayonnement globale (w/m^2)
V	Vitesse de vent (m/s)
Q_a	Chauffage d'air (W/m^2)
T_e	Température extérieur ($^{\circ}C$)
T_i	Température intérieur ($^{\circ}C$)
P_e	Pression extérieur (hPa)
P_i	Pression intérieur (hPa)
S	Surface d'ouvrant (m^2)
$a_{ik}(t)$	L'activation de neurone i de la couche K à instant t
n_{k-1}	Le nombre de neurones de la couche $K-1$
η	Le pas d'adaptation
δ_j	Terme d'erreur de nœud j .

Liste des tableaux

Tableau. 2.1. Les données météorologies sur 24 heures.....	35
Tableau. 3.1. Les fonctions de transfert d'un réseau de neurone.....	39
Tableau. 3.2. les étapes d'algorithme d'apprentissage hybride.....	46
Tableau. 4.1 Comparaison des résultats donnés par Matlab Fuzzy Logic Toolbox et ceux obtenus avec Quartus II.....	96

Introduction Générale

Contrairement aux animaux, les plantes sont immobiles. En conditions de plein champ, elles sont soumises à des conditions climatiques qui peuvent varier beaucoup. Les plantes ne peuvent se soustraire aux vents violents, aux températures extrêmes, aux pluies, aux développements de maladies et de ravageurs ... etc.

Il paraît évident que les conditions de croissance des plantes sont souvent loin d'être optimales pour les besoins d'une production maximale de produits et de qualité. Les agriculteurs ont certes quelques moyens d'action sur l'environnement, ils peuvent planter des brise vents, installer des réseaux de drainage et d'irrigation, apporter des engrais, traiter contre les maladies et les ravageurs qui menacent leurs cultures. Ils peuvent aussi utiliser des cultivars résistantes aux stress, aux maladies et ravageurs. Mais leurs moyens d'action restent limités, ne serait ce que les techniques performantes sont difficiles à rentabiliser pour la culture de plein champ.

Le produit agricole n'atteint habituellement pas de prix suffisants pour justifier les dépenses et les investissements très élevés, ce qui autorise et encourage l'investissement dans des outils de maîtrise d'environnement autrement dit la production sous serre.

Cependant la serre, à l'origine conçue comme simple enceinte limitée par une paroi transparente, amplifie certaines caractéristiques du climat extérieur créant alors des conditions favorables aux cultures. Mais le métier de producteur sous serre est l'un des plus exigeants qui soit. Les producteurs sous serre doivent savoir tout à la fois.

L'acte de produire apparaît lui-même incroyablement complexe. Les producteurs sont confrontés, dans la pratique journalière de leurs activités, à des problèmes qui mettent enjeu les interactions du climat, de l'irrigation fertilisante, des cultures, des agents pathogènes ... etc.

La création d'un outil de soutien à la prise de décision, basé sur des modèles, devrait simplifier le travail des producteurs à l'avenir.

Diverses approches de gestion climatique ont émergé, incluant l'utilisation de dispositifs de régulation conventionnels, tandis que d'autres adoptent des méthodes

d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones, le neuro-flou, et bien d'autres.

Avec ces nouvelles techniques, les futures systèmes de régulation devront pouvoir gérer les serres de façon optimale, de manière à atteindre la meilleure rentabilité économique possible en tenant compte de toutes les contraintes existantes qu'elle soit humaines, techniques, climatique ou économiques (coût des consommables, prix à la vente ...) ainsi que de celle liées à la protection de l'environnement.

C'est sur cette observation que nous avons initié cette étude, dont l'objectif principal réside dans l'exploration de l'automatisation des serres agricoles en appliquant les nouveaux outils de modélisation, d'optimisation et de contrôle, à savoir l'intelligence artificielle, la logique floue et les réseaux de neurones.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres, le premier chapitre (I) est réservé à la présentation d'une serre dans le cadre général d'une gestion automatisée ou bien gestion pilote.

Le deuxième (II) est réservé à la présentation d'un modèle de connaissance de la croissance de la plante application à la tomate.

Le troisième chapitre (III) est réservé à la présentation d'une technique très avancée basée sur les concepts de neuro-flou pour contrôler le comportement interne de la serre basée sur des données réelles (les enregistrements ont été réalisés durant la période allant du 05 février au 20 mars de l'année 2012 site Benomor à Guelma, Algérie).

Le quatrième chapitre (IV) est réservé à l'implémentation de notre contrôleur neuro-flou sur une carte FPGA. Et finalement, une conclusion générale dans laquelle on présente les perspectives offertes par ce travail.

CHAPITRE 1. Généralités sur les serres agricoles

Introduction

Le terme "serre" dérive du verbe "serrer", impliquant ainsi un espace restreint où l'objectif serait de loger autant de plantes que possible. Cependant, cela ne représente qu'une facette limitée du rôle de la serre contemporaine.

Initialement conçue comme un abri rudimentaire ou un espace clos dédié à la culture et à la protection des plantes en utilisant l'énergie solaire, la serre a évolué pour devenir un espace industriel de production végétale. Son objectif est d'ajuster l'environnement direct de la plante afin d'accroître sa productivité et sa qualité. Ainsi, elle permet de la libérer des contraintes du climat extérieur, du sol local et même des variations saisonnières.

Les conditions climatiques qui impactent l'environnement intérieur de la serre comprennent la température et l'humidité de l'air, l'insolation, ainsi que les vents extérieurs. En réalité, chacun de ces éléments engendre une combinaison d'effets, pouvant être bénéfiques ou nuisibles en fonction des conditions locales prévalentes. La température joue un rôle primordial dans la croissance et le développement des végétaux. Les niveaux de CO₂ et de vapeur d'eau ont une influence décisive sur la transpiration, la photosynthèse et la propagation des maladies fongiques. L'énergie solaire participe également au processus de photosynthèse. Par exemple, des matériaux de couverture comme le verre, qui sont transparents aux rayonnements courts mais opaques aux rayonnements infrarouges, induisent un effet de serre, contribuant ainsi à augmenter la température sous la serre. Les vents créent des variations de pression sur la serre, pouvant provoquer des dommages en cas d'intensité excessive. Ils favorisent également la convection et jouent un rôle majeur dans la ventilation naturelle. Une gestion précise du modèle énergétique du climat permet donc de maîtriser ces paramètres et d'améliorer les fonctions physiologiques des plantes (Mistriotis et al., 1997b).

Dans ce chapitre, notre but est de revisiter les mécanismes impliqués dans le microclimat au sein de la serre. Nous exposons également les buts de notre étude ainsi que la méthodologie que nous avons sélectionnée pour sa réalisation.

1.1 Description de la serre et de son micro climat

Deux catégories de serres sont distinguées : les serres horticoles, dédiées aux cultures ornementales, et les serres tunnels.

1.1.1 Les structures de serres en forme de tunnels

De manière générale, la serre tunnel se compose d'une série d'éléments adjacents, chacun étant constitué d'une structure en tubes d'acier et de profilés assemblés à l'aide de boulons. Sa largeur varie de 3 à 9 mètres. Le film plastique est fixé à l'aide de divers systèmes de clips qui maintiennent le film contre les profilés ou entre des baguettes sur toute la longueur de la serre. Bien que la forme classique de la serre tunnel soit arrondie, des modèles à parois verticales existent également, similaires à ceux des serres en verre. De plus, certaines de ces serres peuvent même être converties en changeant leurs couvertures.



Fig. 1.1. Serre tunnel

1.1.2 Les structures de serres pour la culture horticole

Une chapelle est l'élément de base dans la construction d'une serre, composée de deux parois latérales verticales (ou légèrement inclinées) et d'un toit à deux pentes, généralement symétriques. Sa largeur est déterminante, avec des dimensions courantes allant approximativement de 3 à 16 mètres. Lorsque deux chapelles consécutives ne sont pas séparées par une paroi interne, on parle de serre à chapelles multiples ou de chapelles jumelées. La ferme représente l'élément structurel porteur principal de la chapelle, se répétant à intervalles réguliers. La distance entre les fermes caractérise le type de serre. Le module est une surface distinctive de la serre, obtenue en multipliant la largeur de la chapelle par la distance entre les fermes. Les pignons sont les parois verticales qui forment les extrémités

d'une chapelle. Le faitage est la ligne formée par le sommet de la chapelle. Le portique était autrefois la structure porteuse, composée des pieds de ferme et d'une poutre reliant les sommets des pieds droits. Cependant, les serres à portique sont de moins en moins courantes. Les pieds droits désignent les parois verticales latérales d'une chapelle. La figure ci-dessous, représentée dans la fig. 1.2, permettra de visualiser en volume ces divers éléments.

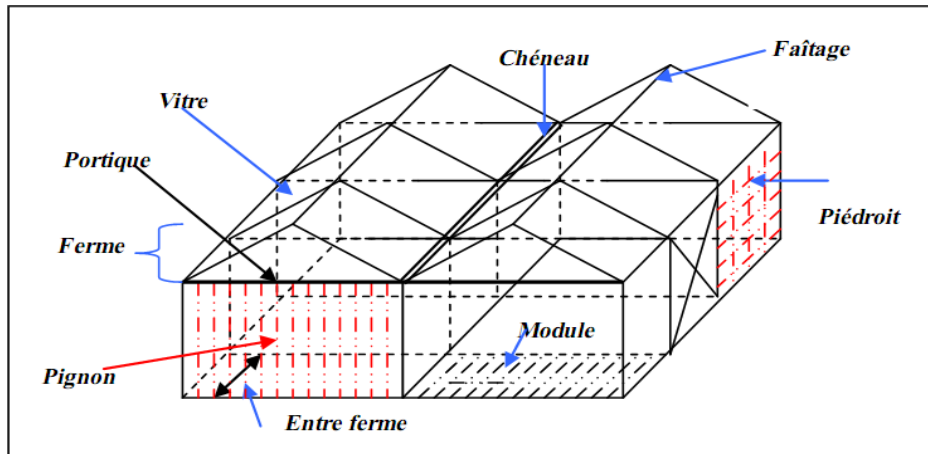


Fig. 1.2a. Disposition d'une serre horticole composée de deux chapelles et de trois modules chacune.

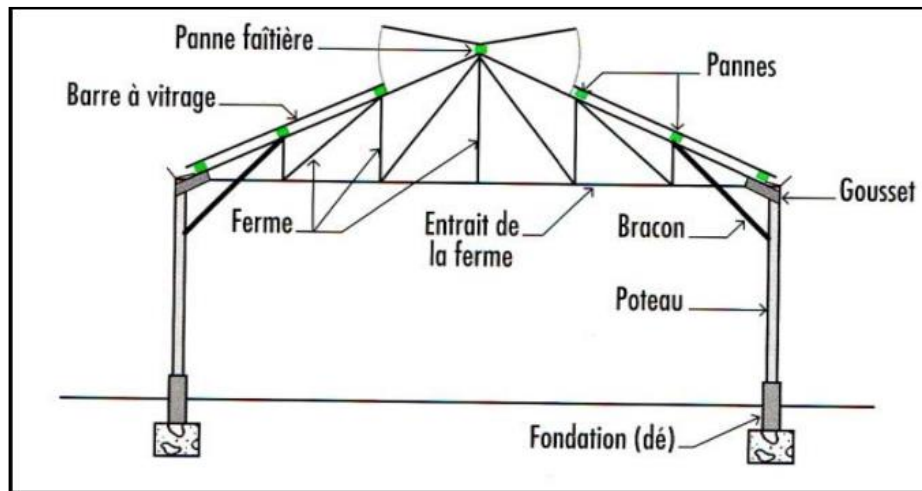


Fig. 1.2b. Architecture d'une serre conventionnelle.

1.1.3 Éléments constitutifs d'une structure de serre

De manière générale, la serre se compose de deux parties distinctes : une structure porteuse qui forme le cadre de l'abri, et une enveloppe qui crée la couverture essentielle pour établir un microclimat spécifique à l'intérieur de la serre.

- **La structure porteuse (ossature)**

C'est la structure fondamentale de la serre, composée d'un agencement de cadres porteurs interconnectés par des pannes et des éléments de triangulation. Les composants porteurs varient en termes de poids et de profil, selon le type de serre. La charpente doit résister aux conditions météorologiques, particulièrement aux vents violents. Les matériaux couramment employés pour la charpente comprennent l'aluminium, le béton, le bois et l'acier galvanisé. Ils ne doivent en aucun cas entraver la pénétration de la lumière solaire.

- L'acier : Prédomine dans la structure de la serre, étant utilisé pour les poteaux, les fermes, les arceaux, les poutres, les pannes et les chéneaux. Il a également été utilisé pour les barres de vitrage ; toutefois, ces dernières années, l'aluminium tend à le remplacer pour cet usage. Les caractéristiques mécaniques avantageuses de l'acier incluent la résistance à la rupture, la limite d'élasticité, l'allongement, la résilience et la capacité à supporter les contraintes, ce qui en fait un matériau propice à ce type de construction. En matière de construction, on privilégie principalement l'acier doux standard ainsi que des aciers mi-durs. Cependant, l'acier présente des inconvénients : sa conductivité thermique élevée et la continuité des liaisons entre la charpente et les éléments métalliques de la couverture peuvent engendrer des pertes de chaleur via des "ponts thermiques".

- L'aluminium : Les alliages d'aluminium sont grandement utilisés dans l'édification actuelle des serres. Toutefois, dans la pratique, l'aluminium est principalement employé en conjonction avec une armature en acier. Les alliages d'aluminium présentent divers atouts : leur résistance à la corrosion est assurée par la formation d'une fine couche superficielle d'alumine grâce à l'oxydation de l'aluminium, ce qui engendre peu voire pas d'entretien requis. Même les éléments ou profils de taille réduite affichent une solide résistance mécanique. De plus, ils sont légers et donc aisément manipulables lors de la construction et des réparations. Cependant, l'inconvénient majeur de ce matériau réside dans sa résistance mécanique relativement faible et dans sa conductivité thermique élevée, qui surpasse celle de l'acier.

- Le béton : Ce matériau est employé pour créer les fondations, les murets en bas des parois et pour le revêtement des allées. Malgré sa robustesse mécanique, le béton présente

divers désavantages : il peut entraver le passage de la lumière solaire et s'avérer très coûteux pour les serres en verre.

- Le bois : Il est désormais réservé à quelques constructions artisanales. Il trouve une utilisation fréquente aussi bien dans les serres avec une couverture en verre que dans celles avec une couverture en matière plastique. Ses atouts se résument en une isolation thermique de qualité, un coût modéré et une manipulation aisée. Cependant, il présente des inconvénients tels qu'une mauvaise adaptation aux structures étanches (à ouvertures) et un entretien non négligeable.

1.1.4 Les matériaux utilisés pour la couverture ou l'enveloppe

Leurs performances doivent être évaluées à divers égards : au niveau de leurs propriétés optiques, en termes de transmission optimale du rayonnement visible nécessaire à la photosynthèse pendant le jour, et en termes d'émissivité minimale dans l'infrarouge thermique pendant la nuit, pour réduire les pertes radiatives. En d'autres termes, leurs caractéristiques thermiques doivent afficher les coefficients de conductivité et de pertes par conduction les plus bas possibles. De plus, leur coefficient de dilatation devrait être réduit pour garantir l'étanchéité. En ce qui concerne leur longévité et leur résistance aux intempéries, si les propriétés optiques et mécaniques des matériaux de couverture sont connues lorsqu'ils sont neufs, il est souvent difficile de juger de leur état après plusieurs années d'exposition à l'extérieur.

- **Le Verre**

Le verre minéral plat, qu'il soit transparent ou translucide, est composé d'un silicate contenant du calcium et de la soude, avec des proportions de silice entre 71 et 74 %, de chaux entre 10 et 15 % et de soude entre 13 et 17 %. Plusieurs variétés de verre sont employées dans les cultures sous serre, comprenant notamment :

- Le verre transparent ou clair, également désigné comme verre horticole, assurant une transmission optimale du rayonnement visible nécessaire à la photosynthèse.

- Le verre martelé ou cathédrale, obtenu par coulage, qui répartit intensément la lumière mais occasionne des pertes élevées par réflexion.

- Le verre horticole à faible émissivité, doté d'une fine couche d'oxyde d'étain pour réduire les pertes radiatives et réaliser des économies d'énergie.

- Le double vitrage, constitué de deux vitres espacées pour minimiser les pertes thermiques, généralement appliqué sur les parois latérales.

- Le verre isolant, préfabriqué avec deux feuilles de verre étanches renfermant un gaz déshydraté, offrant une isolation thermique accrue malgré une réduction de la transmission lumineuse.

- Les verres trempés, armés et feuilletés, plus solides que les précédents, adaptés aux zones à risque de grêle ou aux serres accueillant du public, mais présentant un coût supérieur.

Ces variations de verre possèdent des caractéristiques spécifiques pour répondre à divers besoins en matière de culture sous serre.

- **Les matériaux plastiques**

Les matériaux plastiques rigides, également connus sous le nom de verres organiques, se présentent de deux manières principales : sous forme de plaques rigides d'une épaisseur d'environ 4 mm (PVC, polyester) ou sous forme de plaques à double ou triple paroi (polycarbonate, polyméthacrylate de méthyle). On peut distinguer quatre principaux types de plastiques rigides de ce genre : le polyester armé de fibres de verre (PRV), le chlorure de polyvinyle biorienté (PVC biorienté), le polycarbonate (PC) et le polyméthacrylate de méthyle (PMMA).

Les matériaux plastiques souples, également appelés films souples, sont utilisés pour recouvrir des structures simples et économiques telles que les tunnels, ainsi que des constructions plus complexes, mais avec une charpente plus légère que celles des serres en verre. Le choix d'utilisation dépend généralement des caractéristiques de ces matériaux, qui sont largement influencées par leur composition chimique. Les films les plus couramment utilisés sont fabriqués à partir de polyéthylène, plus précisément du polyéthylène à basse densité (PE bd), accompagné de nombreux produits dérivés (PE thermiques). En revanche, le polychlorure de vinyle (PVC) plastifié est peu utilisé pour couvrir les serres dans notre pays.

1.1.5 Les diverses catégories de structures de serre

La classification des serres est une tâche complexe et souvent délicate, qui repose fréquemment sur les formes adoptées par les cadres porteurs qui composent la structure. On peut identifier deux principales catégories appartenant à deux larges familles de serres : les serres de type chapelle et les serres tunnels. De plus, on peut également les différencier en fonction des caractéristiques de leur toit, incluant les chapelles à versants plats et poteaux verticaux, les chapelles dissymétriques, les chapelles sans poteaux verticaux, les chapelles à pieds droits inclinés, et ainsi de suite.

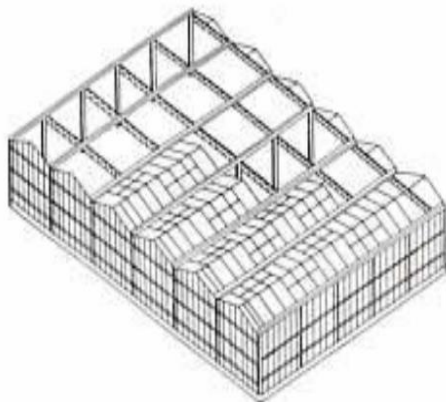


Fig. 1.3. Structure de Serres multi chapelles

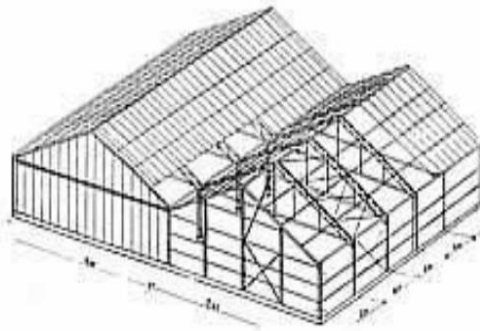


Fig. 1.4. Serre doubles chapelles

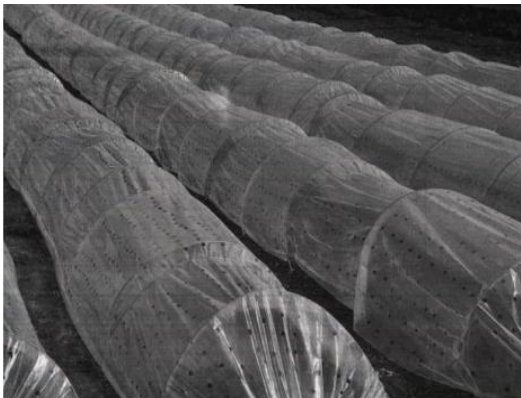


Fig. 1.5. Serre tunnel



Fig. 1.6. Serre de reproduction

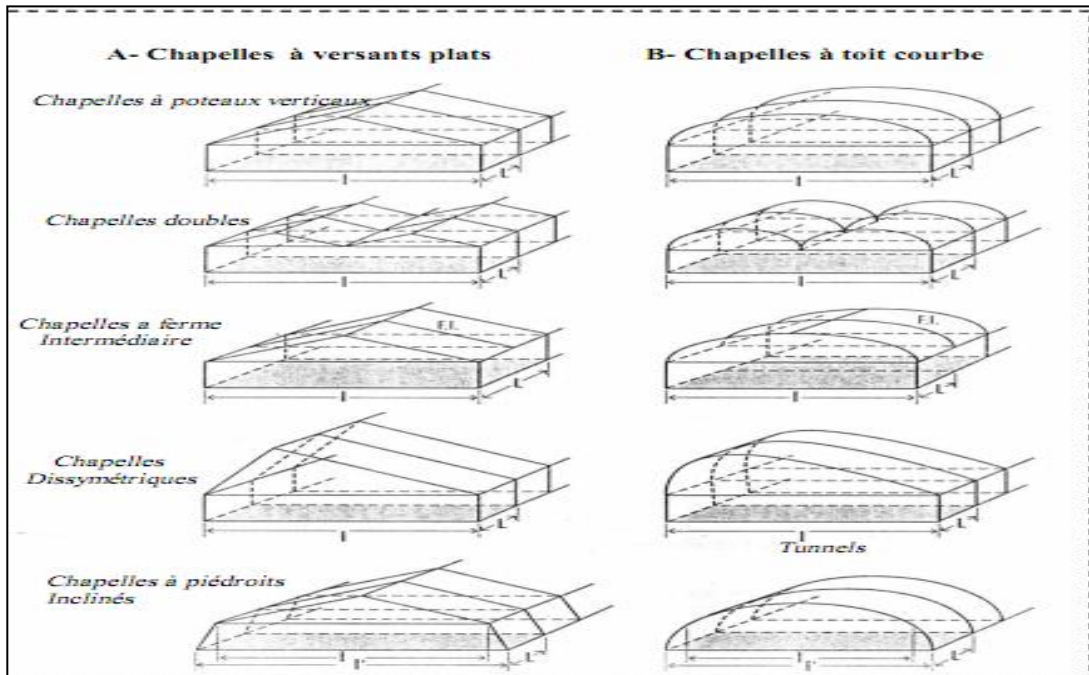


Fig. 1.7. Classification des serres agricoles

D'autres types de serres plus petites, appelées "petits tunnels" (voir fig. 1.5), ont également émergé. Ce type de serre s'est rapidement répandu dans les régions méditerranéennes en raison de leur coût réduit. Leur structure repose sur des arceaux avec une base de 1,5 mètre de large et une hauteur de 0,45 mètre, tandis que leur longueur ne dépasse pas 20 mètres. Le classement des serres peut également être basé sur leur domaine d'utilisation :

- Les serres enterrées, principalement axées sur la multiplication (fig. 1.6) ou la culture en pots. Elles sont construites sur des murettes et les niveaux des tablettes sont presque au niveau du sol. Les couloirs sont creusés dans le sol et ensuite maçonnés.
- Les serres maraîchères, souvent désignées à tort comme "serres de type hollandais", avec une largeur de 3 mètres. On les trouve notamment dans d'anciens établissements d'horticulture florale et elles sont principalement utilisées en maraîchage.

- Les serres de multiplication, étroites et bien isolées pour maintenir des températures élevées. Elles ont une faible hauteur et des chapelles d'environ 3 mètres de large.
- Les serres horticoles et florales (fig. 1.9), aérées et pouvant être simples ou multi-chapelles. Les largeurs de chapelle varient de 6 à 20 m. Les serres florales, utilisées pour la production de fleurs coupées, sont souvent très larges.
- Les serres horticoles pour les plantes en pots (fig. 1.8), d'une largeur de 15 à 20 m.
- Les serres roulantes, assez particulières, sont utilisées pour le forçage de plantes vivaces ou d'arbustes qui restent en place pendant de longues périodes.



Fig. 1.8 : Serre Horticole



Fig. 1.9 : Serre Florale

1.1.6 Le microclimat à l'intérieur de la serre

Le développement et la croissance des organes d'une plante ou d'une culture sont étroitement régis par les conditions climatiques. C'est pourquoi les cultivateurs en serre considèrent le climat comme un élément déterminant du rendement, cherchant à le quantifier pour atteindre des performances optimales tout en garantissant les conditions climatiques requises.

- **Le climat naturel de la serre**

Le climat intrinsèque à l'intérieur de la serre repose principalement sur le climat extérieur, les caractéristiques physiques de l'air intérieur, la configuration, le volume et l'orientation de la serre, ainsi que les propriétés physico-chimiques des matériaux de la couverture utilisés. Les paramètres clés du milieu interne d'une serre, qui diffèrent de

l'extérieur, englobent la température, l'éclairage, l'humidité et les concentrations de gaz tels que le CO₂ et l'O₂.

Sous l'environnement de la serre, les conditions lumineuses sont étroitement liées aux variations naturelles de luminosité, bien qu'elles soient réduites quantitativement et modifiées qualitativement en fonction des matériaux constituant la structure et l'enveloppe. L'exploitation optimale de ce climat naturel dépendra du choix des matériaux de couverture ainsi que des modalités de leur installation, incluant la structure, la forme et l'orientation des abris. Il convient de noter que la température de l'air à l'intérieur d'une serre découle d'un équilibre énergétique propre à l'enceinte.

Les conséquences de l'effet de serre sont généralement les suivantes :

Pendant la journée, les effets combinés du captage du rayonnement solaire et de la réduction des échanges convectifs entraînent une augmentation de la température de l'air à l'intérieur de la serre. Cette élévation peut devenir rapidement excessive en l'absence de ventilation, surtout lorsque le rayonnement solaire est intense. Les variations de la température ambiante influencent également la température du sol et des organes végétaux, bien que ces dernières varient avec une amplitude moins importante. Ces variations peuvent être évaluées différemment en fonction des matériaux de couverture utilisés. De plus, la température des plantes est influencée par celle du vitrage, avec un effet plus prononcé à courte distance en raison des échanges thermiques par rayonnement.

Pendant la nuit, en raison de la diminution des pertes par rayonnement infrarouge, les températures minimales à l'intérieur de la serre sont généralement de 1 à 3 °C plus élevées en moyenne que celles à l'extérieur. Cependant, lors de nuits claires, des phénomènes d'«inversion de température» peuvent survenir, entraînant des chutes de température plus marquées qu'en plein air.

La confinement et l'étanchéité de la serre favorisent l'accroissement de l'humidité absolue, tandis que l'élévation de la température de l'air tend à augmenter le déficit de saturation, entraînant les conséquences suivantes :

Pendant la journée : L'humidité absolue augmente avec la transpiration, cependant, la hausse de la température de l'air peut entraîner une réduction excessive de son humidité relative, ce qui peut causer un véritable « stress hydrique » pour les plantes.

Pendant la nuit : Étant donné que les serres sont généralement closes, l'humidité relative est élevée pendant la nuit. À mesure que la température baisse durant la nuit, des condensations se forment fréquemment sur les parois et sur les végétaux, créant des conditions propices à certaines maladies. Pendant la nuit, en raison de l'accumulation du dioxyde de carbone provenant de la respiration des plantes, son taux dépasse souvent les niveaux normaux extérieurs, tandis qu'en journée, grâce à la photosynthèse, ce taux diminue en dessous de celui de l'extérieur. Lors d'une journée ensoleillée où la serre reste fermée, le taux de dioxyde de carbone peut devenir bas, inférieur à 200 ppm, ce qui peut limiter la production. Cette situation climatique spontanée peut être améliorée en utilisant divers équipements de climatisation tels que l'aération, le chauffage, l'aspersion ou la brumisation, etc.

- La ventilation :

La ventilation consiste à échanger l'air entre l'intérieur de la serre et l'extérieur. Ce mécanisme permet plusieurs choses : évacuer l'excès de chaleur et réduire la température ambiante ; ajuster l'humidité en éliminant plus ou moins rapidement l'air intérieur chargé en vapeur d'eau due à la transpiration des plantes ; pendant la journée, il est essentiel d'éliminer l'eau transpirée pour éviter une humidité excessive, proche de la saturation, qui peut favoriser les maladies et entraver la croissance des végétaux.

L'importance de la ventilation d'une serre peut être mesurée par le débit d'air échangé (le volume d'air entrant ou sortant par unité de temps). Cependant, pour comparer différentes serres, il est plus pratique d'utiliser le taux de renouvellement d'air, qui est le rapport entre le débit d'air et le volume total de la serre.

Le problème du refroidissement des serres lorsque la température intérieure dépasse les limites admissibles pour les cultures reste une question cruciale, notamment pour les structures en plastique. En général, l'aération est assurée en ouvrant l'une des deux portes de la serre du côté opposé au vent et en espaçant les sections de bâche plastique tous les quatre mètres de manière alternée des deux côtés de la serre. Dans les modèles plus simples, l'aération est réalisée en soulevant le film sur les côtés.

Pour les modèles plus avancés, des ouvrants sont placés au milieu des montants et se rapprochent de plus en plus du faîtage, créant ainsi des parties à toit ouvrant qui offrent une large ouverture pour l'aération. Cependant, le principal inconvénient de cette approche est l'emprisonnement de l'air et la condensation d'humidité dans cette partie de la serre. Les schémas ci-dessous illustrent différentes configurations d'aération, commençant par une aération sur un seul versant (fig. 1.10), une aération sur deux versants (fig. 1.11), une aération latérale (fig. 1.12), et enfin une aération automatisée avec des équipements tels qu'un écran thermique ou un filet anti-insectes.



Fig. 1.10. Ventilation par un seul coté

Fig. 1.11. Ventilation par deux cotés



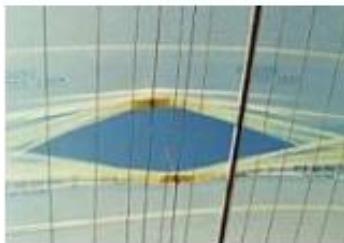
Aération latérale par enroulement, mécanisme central.



Aération latérale par enroulement avec tube de maintien.



Aération latérale par enroulement avec filet brise-vent et mécanisme d'extrémité.



Ouverture latérale



Aération latérale par gravité.



Ouvrant latéral 1,30 m.

Fig. 1.12. Les méthodes de ventilation latérale pour les serres

- **Impact des facteurs climatiques**

Influence de la température : Les variations naturelles de la température dues au rayonnement solaire peuvent être insuffisantes à certaines périodes de l'année (nécessitant une réduction des pertes de chaleur) et excessives à d'autres moments (nécessitant un abaissement de la température). Il serait donc préférable, pour réguler les températures, de prendre en compte les exigences thermiques diurnes et nocturnes des cultures en serre,

d'établir un équilibre entre les températures de l'air et du sol, et d'ajuster les conditions en fonction de l'éclairement.

Influence de l'humidité : Pendant la nuit, les serres étant généralement closes, l'humidité relative de l'air à l'intérieur est élevée. Des condensations se forment fréquemment sur les parois et peuvent se déposer sur la végétation, créant ainsi des conditions propices au développement des maladies cryptogamiques. Pendant la journée, l'élévation de la température de l'air peut entraîner une réduction excessive de l'humidité relative, provoquant un véritable « stress hydrique » pour les plantes. Ainsi, en cas de faible humidité relative, il est possible de l'augmenter en utilisant des nébulisations (la dispersion en fines gouttelettes permet une meilleure efficacité pour apporter de l'eau). En revanche, pour réduire le taux d'humidité, la ventilation ou l'aération sont nécessaires.

Influence de la lumière : Sous abri, les niveaux d'éclairement sont étroitement liés au climat lumineux naturel. La manière optimale d'utiliser cette source lumineuse naturelle dépendra du choix des matériaux de couverture. Durant les périodes de faible ensoleillement, la quête d'une illumination maximale est généralement privilégiée. En revanche, lors de périodes d'ensoleillement intense, il est souvent nécessaire de réduire les apports lumineux (par le biais de l'ombrage) pour éviter des surchauffes nuisibles à la culture et pour prévenir un déséquilibre dans l'approvisionnement en eau dû à une évaporation excessive.

Cependant, l'effet de l'abri entraîne une réduction de la lumière par rapport à l'extérieur, ce qui se traduit par une diminution de la photosynthèse due à la présence de la couverture qui agit comme un facteur limitant pour la lumière. Cette diminution de la photosynthèse peut éventuellement prolonger la durée de la culture.

Influence du dioxyde de carbone (CO₂) : La concentration en CO₂ constitue l'un des trois facteurs essentiels à la photosynthèse, étant la concentration de gaz carbonique. Une présence accrue de CO₂ favorise une meilleure photosynthèse. Pendant la nuit, à l'intérieur de l'abri, il en résulte une augmentation de la teneur en CO₂. En effet, le taux de dioxyde de carbone dans une serre suit un cycle de 24 heures. Les plantes continuent de respirer ; pendant la journée, le CO₂ est absorbé par le processus chlorophyllien, et la concentration de gaz carbonique, qui est élevée au petit matin, diminue en fin d'après-midi. Lorsque les quantités de CO₂ dégagées et absorbées atteignent un équilibre, on atteint le point de compensation.

Ce point de compensation représente l'intensité lumineuse pour laquelle les quantités de CO₂ dégagées et absorbées sont exactement équivalentes. Au-delà de ce point, la plante produit davantage de glucides par photosynthèse que ce qu'elle en dégage par respiration.

1.2. Problématique de la gestion des serres

L'objectif principal de la production végétale sous serres est d'incrémenter les revenus financiers des agriculteurs en trouvant un bon compromis entre les revenus d'exploitation (amélioration de la quantité et de la qualité du produit horticole, et les coûts financiers des investissements (nouvelles structure de serres et stratégies de contrôle automatique). Quelques auteurs (Berenguel, M, 2003), (Bidwell, R, G, S, 1964), (Brdys, M, A, 2002), ont décrit la serre comme un système de commande hiérarchique avec trois niveaux de commande.

Niveau 1 : régulation et contrôle du microclimat en temps réel

Ce niveau est le niveau de base, celui de la mesure des paramètres et du maintien des consignes. L'échelle de temps est très courte, de l'ordre de la minute.

Ce niveau comporte les capteurs reliés aux entrées. Les actionneurs reliés aux sorties de l'ordinateur climatique, accompagné de leur électronique de conditionnement. Il exclut tout véritable traitement informatique (draoui, 1994) A ce niveau, il s'agit essentiellement :

- D'acquérir les informations à l'aide de capteurs. Ces informations, le plus souvent de type physique (climat) ou plus rarement de type biologique (physiologie, croissance, morphologie ...) acquises en temps réel, sont utilisées dans les algorithmes de régulation et de contrôle. Ces derniers assurent le déclenchement (ou l'arrêt des fonctions de climatisation (chauffage, ventilation) et le maintien des consignes.
- De définir et transmettre les informations nécessaires au niveau immédiatement supérieur où elles seront analysées, puis traduites éventuellement sous forme de nouvelles consignes que le premier niveau devra réaliser.
- D'éviter les situations conflictuelles entre les différentes fonctions de climatisation, en appliquant les priorités affectées à l'avance (ne pas enrichir en CO₂ si l'aération dépasse un certain seuil).
- De déclencher les alarmes lorsqu'un des paramètres de contrôle dépasse des valeurs-seuils préalablement fixés.

Niveau 2 : *croissance et développement de la culture à court terme*

L'échelle de temps considéré au niveau 2 est de l'ordre de l'heure ou de la journée.

Ceci correspond à la gestion en temps réel des capteurs et des actionneurs à un niveau où un logiciel est intégré dans un module intelligent centralisé (l'ordinateur climatique).

L'objectif est la gestion des fonctions physiologiques impliquées dans la croissance et le développement à court terme des plantes photosynthèse, respiration, transpiration ...etc.

La réalisation du niveau 2 repose sur l'exploitation de modèle de croissance, d'évapotranspiration. Le niveau 2 détermine les consignes à appliquer au niveau 1, et les données d'entrées du niveau supérieur, où sera effectuée l'intégration de ces données journalières.

Niveau 3 : *croissance de la culture à long terme.*

L'échelle de temps considéré au niveau 3 est supérieure à la journée.

C'est le niveau de l'optimisation bioéconomique de l'aide à la décision stratégique. L'objectif du niveau 3 est de fournir au producteur des solutions considérées comme proches de l'optimum économique, en fonction du :

- type de serre et d'équipement
- type des plantes cultivées
- du coût de l'énergie et de la main d'œuvre,

1.3. Contrôle du climat sous serre

1.3.1 Généralité sur la régulation sous serre

La régulation climatique d'une serre vise à maintenir simultanément l'ensemble des facteurs climatiques (température, hygrométrie, taux de CO₂...) au voisinage de leurs valeurs de consignes respectives tout en respectant certaines règles imposées par l'utilisateur.

1.3.2. Données employées par le mécanisme de contrôle :

Les données utilisées dans la régulation des systèmes informatiques de gestion climatique se concentrent principalement sur le niveau de rayonnement reçue, l'hygrométrie, la vitesse et la direction du vent, le taux de CO₂ et les positions des ouvrants et d'écrans.

Il est important de souligner que la qualité de la régulation dépend de la précision et de la fiabilité des capteurs utilisés. Il est donc essentiel pour l'utilisateur d'utiliser des capteurs de qualité, dont il doit vérifier régulièrement le bon fonctionnement. Les mesures couramment réalisées sous serre, fig. 1.13 :

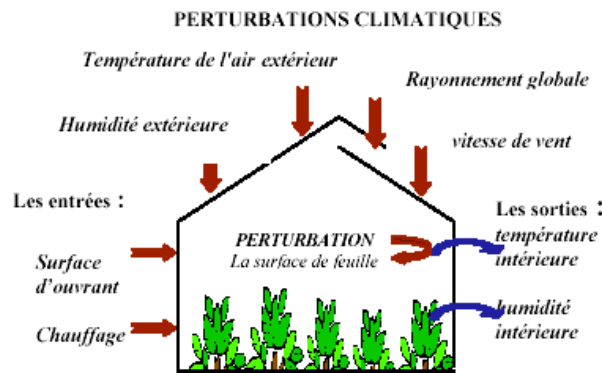


Fig. 1.13. Le système du climat d'une serre

Les mesures de perturbation :

- rayonnement globale
- température d'air extérieur
- humidité relative de l'air extérieur
- vitesse du vent
- orientation du vent
- présence ou absence de pluie

Les mesures de commande :

- Température intérieur
- Humidité relative de l'air intérieur
- Rayonnement intérieure
- Position des ouvrants

- Position des écrans thermique ou d'ombrage

1.3.3. Surveillances réalisées par le mécanisme de régulation de la serre

Les appareils de contrôle reçoivent des signaux d'information des capteurs (ainsi d'horloge) et envoient des ordres aux actionneurs par l'intermédiaire de relais électriques.

Les principales fonctions des équipements de serre sont le chauffage, l'aération, l'ombrage, l'injections de CO₂ et l'humidification de l'air.

Les objectifs fondamentaux de la régulation sous serre sont :

- ❖ Fonction de chauffage :

L'objectif de contrôle thermique consiste à ajuster les apports de chaleur en fonction des exigences des cultures. Un objectif secondaire du chauffage est la déshumidification de l'air.

- ❖ Rôle de la ventilation

Le principal objectif de la ventilation est de maintenir la température de l'air à l'intérieur de la serre en dessous de la limite maximale autorisée. La ventilation peut également être utilisée pour contrôler l'humidité atmosphérique et faciliter l'entrée de CO₂ en l'absence d'enrichissement, ou inversement, pour prévenir les pertes de CO₂ en cas d'injection. Les mécanismes d'ouverture des ouvertures ou des extracteurs sont activés en fonction de relevés de température, d'humidité de l'air ou de taux de CO₂. En ce qui concerne spécifiquement les ouvertures, il est important qu'elles puissent être verrouillées en cas de vent fort ou de pluie. Par conséquent, le fonctionnement de l'aération par ouvertures est généralement lié à des mesures de vitesse et de direction du vent, ainsi qu'à la détection de la pluie.

- ❖ Rôle d'ombrage

La principale fonction de la régulation de l'ombrage est de restreindre la quantité d'énergie solaire pénétrant dans la serre, ce qui peut entraîner une augmentation excessive de la température à l'intérieur. Le contrôle de l'écran d'ombrage est donc basé sur des mesures liées au temps (horloge), à la température de l'air intérieur ou au niveau de rayonnement reçu.

❖ Fonction enrichissement par CO₂

L'objectif principal de l'enrichissement par CO₂ est de maintenir le taux de CO₂ l'intérieur de la serre au dessus du seuil fixé par l'utilisateur, l'enrichissement de CO₂ n'a aucune raison d'être pratiqué durant la nuit, et il doit être évité lorsque la serre est fortement ventilée. Il faut donc également asservir l'enrichissement de CO₂ à des mesures du temps (horloge) ou la lumière, et de position des ouvrants.

❖ Rôle d'humidification

La fonction de régulation de l'humidification de l'air vise à maintenir l'humidité relative à l'intérieur des serres au niveau déterminé par l'utilisateur. L'activation de la brumisation ou de la nébulisation fine dépend des mesures de l'humidité de l'air et de sa température.

❖ Autres fonctions :

Les écrans thermiques, les bassins tampons, les systèmes de déshumidification, les lampes d'éclairage...sont autant d'équipements dont le fonctionnement peut être réglé en fonction de mesures de température, l'hygrométrie ou de la lumière. Il ne faut pas oublier non plus les horloges qui jouent un rôle de premier plan dans la régulation.

1.3.4. Evolution de La mission des contrôleurs de serre de la régulation :

Il est certain que les systèmes de régulation devront pouvoir assurer des fonctions plus complexes à l'avenir .Ils devront pouvoir être utilisés à des fins de simulation ayant pour l'objectif de fournir aux producteurs des éléments de décision à l'heure des choix tactiques et stratégiques.

Les futurs systèmes de régulation devront pouvoir gérer les serres de façon optimale, de manière à atteindre la meilleure rentabilité économique possible en tenant compte de toutes les contraintes existantes, qu'elles soient humaines, techniques, climatiques et

économiques (coût des consommables, prix à la vente), ainsi que de celles liées à la protection de l'environnement.

1.3.4.1. Qu'est-ce qui est contrôlé par un système automatisé :

Dans un système utilisant la régulation traditionnelle, on avait un thermostat pour contrôler et réguler le chauffage, un deuxième pour contrôler la ventilation, et un hygromètre pour enregistrer et contrôler l'humidité de la serre. Si une de ces lectures n'est pas de bonne qualité ou manque de calibration, le système pourrait fonctionner en même temps que le système de ventilation. Afin d'éviter le gaspillage, les trois peuvent être intégrés et harmonisés dans le même logiciel, et on parle alors de régulation intégrée.

1.3.4.2. Le contrôle automatisé :

Les contrôleurs climatiques sont de plus en plus utilisés pour contrôler le climat des serres. Le contrôle automatisé des serres a été développé, il y a quinze ans, mais la technologie a beaucoup évolué au cours des 5 dernières années. Il y a actuellement plusieurs systèmes de contrôle disponibles sur le marché. Mais d'abord quels sont les avantages et désavantages de ces systèmes automatisés.

❖ Les avantages :

- Le contrôleur est capable d'effectuer une cueillette exhaustive et continue des données nécessaires à la gestion du climat.
- Il excelle dans l'accomplissement d'opérations répétitives nécessaires à des calculs exhaustifs.
- Il gère les situations conflictuelles concernant les processus contrôlés à l'intérieure d'un programme de contrôle du climat (les conflits entres les systèmes de chauffage, de ventilation et d'éclairage etc.)
- Il peut être réparé facilement et tombe en panne moins souvent qu'un système manuel.
- Un système automatisé peut prendre des mesures d'urgence et activer des alarmes et des systèmes de soutien, si des anomalies surviennent.
- Le producteur peut visualiser l'état des serres à distance, en utilisant les lignes téléphoniques et un ordinateur.

- L'utilisation des contrôleurs libère le producteur des aspects les plus exigeants du contrôle du climat et lui donne des outils et des données qu'il n'aurait pas autrement, tout en diminuant les coûts de main d'œuvre.
- l'intégration des interactions biologiques peut être incluse dans un système informatisé en ce qui concerne les besoins des plantes en lumière, en chaleur, en CO₂ et en eau.
- L'ordinateur permet un contrôle plus précis et flexible des conditions climatiques ce qui peut se traduire par des augmentations de rendements et des diminutions de coûts de chauffage et d'éclairage.

❖ **Les désavantages :**

- Les systèmes automatisés peuvent coûter cher, mais le producteur peut récupérer l'argent investi au cours des trois ou quatre années suivant l'installation d'un tel système.
- l'appropriation d'un système automatisé peut causer quelques difficultés pour le producteur. Par contre, la simplicité des interfaces graphiques de ces logiciels permet aux agriculteurs de communiquer facilement avec le contrôleur.

Conclusion

Les contrôleurs de serre tendent à devenir plus sûrs, plus ouverts et plus souples d'utilisation. A l'avenir, les ordinateurs de serre devront aussi permettre à leurs utilisateurs de véritablement piloter leur serre en intégrant la régulation climatique, en utilisant les informations fournies par les capteurs nouveaux, en recourant aux banques de données et en faisant plus largement appel à la modélisation, à la commande et à l'optimisation.

CHAPITRE 2. Modélisation de la croissance de la plante (tomate)

Introduction

Au sein des pays limitrophes de l'Algérie, en particulier le long du pourtour méditerranéen, la culture précoce de la tomate, un produit phare destiné à l'exportation, a subi une profonde transformation technologique au cours de la dernière décennie. Cette évolution vise à répondre aux impératifs de qualité et de calendrier imposés par les marchés, tout en relevant le défi de la compétitivité face à d'autres sources concurrentielles.

Ces évolutions ont engendré des changements significatifs dans la production. Une grande partie des cultures en plein champ a été reconvertie, réduisant leur envergure de 70% en seulement dix ans. Les efforts d'adaptation et de modernisation touchant les techniques de production, l'emballage et la commercialisation ont permis de doubler les volumes de tomates exportées. Bien que la tomate occupe la deuxième place parmi les produits maraîchers en Algérie, reflétant sa place dans les habitudes alimentaires, elle n'a malheureusement pas connu le même niveau de développement que chez nos voisins. Les cultures en plein champ peinent à répondre à la demande de tomates, même avec l'augmentation des surfaces qui leur sont dédiées. Cela souligne la nécessité de privilégier la culture sous abris.

C'est cette situation qui a principalement orienté mes travaux vers la modélisation de la croissance de la tomate.

2.1 Exigence climatique

La tomate d'origine tropicale, a des exigences particulières : est sensible au froid, craint beaucoup le gel, craint les vents chauds et est très exigeante en température.

2.1.1 Température

La température joue un rôle prépondérant dans la production de la tomate, étant le facteur le plus influent. La réaction de la tomate aux variations thermiques est particulièrement marquée. La gestion des températures est une tâche difficile, car elles n'influent pas seulement sur la photosynthèse, elles influent également sur la respiration et les translocations. Il est important de noter que les températures de nuit et de jour jouent des rôles totalement différents : la température de nuit favorise la respiration (perte de matières sèches : activité à minimiser), alors que la température de jour favorise la photosynthèse

(production de sucre : activité à maximiser), C'est pour cette raison qu'on a deux consignes de température : l'une de jour et l'autre de nuit. Dans le cas de la tomate

- Les basses températures (<10°C) :

Ralentissent la croissance et le développement des plantes entraînent :

- des ramifications des bouquets,
- des difficultés de nouaison et la formation des fleurs fasciées.

- Par contre les températures élevées :

La persistance d'un temps chaud et sec peut entraîner :

- un allongement anormal du pistil pendante.
- une autopollinisation difficile.

- Au dessus de 30°C (>30°C):

- Le lycopode, pigment responsable de la couleur rouge de fruit, ne se forme plus.

On sait depuis longtemps que l'optimum de température sur 24h est de l'ordre de 25°C pour la croissance, quelle que soit la manière dont celle-ci est définie :

Accumulation de matière sèche, augmentation de la surface foliaire, ou allongement des tiges (Went. 1944, Hussey. 1965).

Des températures de jour supérieures à celles de nuit favorisent l'accumulation de matière sèche, l'allongement des tiges et la nouaison. D'après (Gent 1988), La différence de température entre le jour et la nuit devrait être de l'ordre de 9°C pour la tomate. Les plantes tolèrent des variations autour des valeurs optimales à condition que celles-ci soient relativement faibles et que l'intégrale de température reste dans les limites admises (Hurd et Graves 1984 ; Heuvelink 1989 ; De Konink. 1990 ; Seginer et al., 1994).

D'autres études, motivées par le besoin de trouver des solutions, des solutions pour réaliser des économies d'énergie, ont permis de préciser encore plus la réponse des plantes aux températures. (Challa, 1978) et (Gent et al, 1979) ont montré qu'il était possible de faire varier les températures de nuit, sans dommage pour la production.

Divers auteurs, comme (Clavert et Slack, 1974), (Acock et al. 1990) ont montré qu'il était possible d'ajuster la consigne de température de nuit en fonction du rayonnement reçu ou du taux de CO₂ pratiqué la veille. Les résultats de ces études sont couramment utilisés par les producteurs de serre pour ajuster les températures des consignes de nuit et de jour. Mais les

réglages réalisés par les producteurs restent relativement grossiers. Il est certain que des économies d'énergie et une amélioration de la production pourraient être obtenues en automatisant tout ou partie du travail de détermination des températures de consigne.

Et d'après (Madrep, Derd, 1999) Les températures optimales sont :

- Températures diurnes :20-25°C
- Températures nocturnes :13-17°C
- Températures de sol :14-18°C

2.1.2. Humidité

L'humidité relative n'intervient pas directement dans la photosynthèse, elle joue un rôle indirect en agissant sur la conductance stomatique par le biais de l'état hydrique foliaire. Une humidité relative de 75% est jugée optimale (Madrepem, Derd, 1999), elle permet d'avoir des fruits de bon calibre, et sans défaut de coloration.

2.2. La modélisation biologique

2.2.1. Hypothèse concerne le modèle

L'évolution de la biomasse d'un couvert végétal est soumise aux différents facteurs

- facteur trophique : eau, éléments minéraux, teneur de l'atmosphère en gaz carbonique.
- Etat photo-sanitaire (maladies et ravageurs)
- facteur génétique : chaque variété possédant un génome propre offre une réponse particulière face aux variations du milieu.
- Facteur énergétique température de l'air, température du sol et ensoleillement.

La méthode de calcul développée ici a permis de déterminer le rendement agricole potentiel d'une variété de tomate. Ce rendement potentiel correspond aux conditions optimales d'entretien photo sanitaire, d'alimentation hydrique et minérale de la culture envisagée. Dans ces conditions le rendement agricole ne dépend que des conditions climatiques (rayonnement globale sur le feuillage, température de l'air,...) Nous admettons d'autre part qu'il y a des injections de CO₂ dans la serre.

2.2.2. Elément de calcul de la courbe de rendement

L'élaboration de matière sèche végétale résulte de processus physico-chimiques et enzymatiques complexes dont le point de départ est la fixation du gaz carbonique de l'air, l'énergie de fixation étant fournie essentiellement par la lumière. Parallèlement au flux entrant de CO₂, les oxydations respiratoires entretiennent, de jour et de nuit, un flux sortant, de sorte que la production nette de matière sèche à l'échelle nyctémérale apparaît comme ce qui reste des assimilés diurnes après dégradation diurne et nocturne. Les mécanismes de développement débouchant sur la floraison, la fructification et la maturation sont sous la dépendance de l'histoire thermique du matériel végétal. (Yves. C, Christien . N, Robert. B, 1979).

En raison des grandes difficultés d'analyse et de mesure des phénomènes intimes de la photosynthèse les quelques tentatives de modélisation de la production végétale, ont été centrées sur la phase de croissance végétative, loin de l'apparition des organes reproducteurs. Aussi, l'étude descriptive, représentative ou prévisionnelle du rendement agricole se réduit encore trop souvent à de simples corrélations entre des rendements observés et les données bioclimatiques ou culturelles disponibles telles que, la température, la pluviométrie, la densité d'engrais. Une démarche d'estimation quantitative de la courbe de rendement agricole, suffisamment rigoureuse pour intégrer les principaux facteurs et mécanismes impliqués dans l'élaboration des produits végétaux, mais restant suffisamment simple pour être transposée à la plupart des cultures.

2.2.2.1 La photosynthèse nette (N) à l'instant i

La formulation de la photosynthèse des couverts végétaux est relativement complexe, cependant, à l'aide d'hypothèse simplificatrice (Chartier 66.Jarvis 68.Waie Wilson 71), on obtient l'expression suivante admise comme traduisant bien les réalités physiques.

$$N_i = a (I_i - I_0) - b (C_i - C_0) / a (I_i - I_0) + b (C_i - C_0) \quad (2.1)$$

(a, b) sont caractéristique du matériel végétal utilisé.

Les points de compensation en lumière et CO₂, I₀, C₀ correspondent aux points en deçà des quels les pertes par respiration sont supérieures aux quantités fixées.

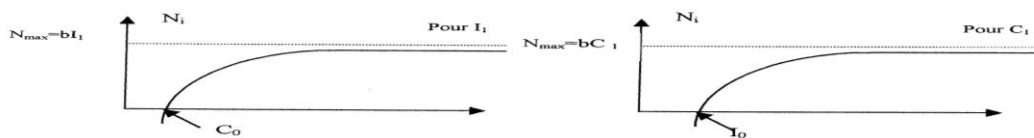


Fig. 2.1 Courbes d'efficacité de la photosynthèse potentielle en fonction de l'énergie lumineuse I et de la teneur en CO₂ de l'air

L'assimilation nette instantanée N_i sera analysée dans la suite, non par rapport à l'unité de surface foliaire comme l'habitude en est classiquement prise, mais par rapport à l'unité de surface du couvert végétal, supposé fermé et dense et absorbant pratiquement tout le rayonnement lumineux actif sur la photosynthèse. La dépendance de l'intensité photosynthétique nette du couvert végétal, vis-à-vis de la température de feuille, n'est pas explicitée dans l'expression de (N). Aussi le poids de la température sera pris en compte au travers de coefficients d'efficient thermique relatif à l'air (ω) et au sol(ϵ). D'autre part si les conditions d'alimentation hydrique et minérale sont limitantes il conviendra d'introduire des coefficients restrictifs. Ces coefficients sont égaux à l'unité dans le cas du rendement potentiel.

2.2.2.2 La respiration nocturne

La respiration nocturne est analysée de manière différente pour les organes végétatifs et pour les fruits. On admet (Moysse, 1950) que la respiration nocturne des organes végétatifs s'opère aux dépens des assimilés de la journée. Le biais des équivalents de CO₂ permet d'écrire une expression simple de la masse totale de gaz carbonique rejetée par le couvert végétal depuis l'instant de la fin de la photopériode jusqu'à tout instant 't' de la phase nocturne. On calcule le bilan global des pertes de matière pour une nuit déterminée en fonction de :

- la durée de la 24-H : (H = durée du jour, en heure).
- La photosynthèse nette du jour précédent (matière première de la respiration).
- Température moyenne de la nuit.

La formulation de respiration des organes végétatifs est complexe car elle est basée sur le fait que la vitesse (u° à 0°) de dégradation des assimilés du jour précédent est modifiée de manière linéaire par les variations de la température moyenne des feuilles (paramètre λ). Pour les fruits, la respiration est le produit du niveau des assimilés de ces fruits le jour précédent et d'une fonction quadratique de la température.

2.2.2.3. Repérage des stades de développement :

La somme de températures efficaces Σ peut être considérée comme un repère valable de l'âge physiologique de la culture (de tomate). Cette somme de températures représente le cumul journalier de la température moyenne de l'aire (θ en C°) diminuée de la température θ_0 , appelée zéro de végétation (qui dépend de la variété) au-dessous de laquelle la plante cesse de croître depuis J_0 jour du semis à J_k jour de sénescence.

$$\Sigma = \sum_{j=J_0}^J (\theta_j - \theta_0) \quad (2.2)$$

Cinq sommes de température sont utilisées comme repères pour le calcul du rendement, ce sont des constantes pour chaque variété donnée :

- \sum_1 caractérise l'état initial de la culture à la plantation $\left[\sum_j - \sum_{j_0} \right]$ quand les feuilles sont étalées.
- \sum_2 nouaison du 1^{er} fruit
- \sum_3 maturation du 1^{er} fruit.
- \sum_4 sénescence du végétal ($J=J_k$)
- \sum_5 somme de température entre chaque nouaison (donc entre chaque récolte)

2.2.2.4. Efficacité de l'assimilation chlorophyllienne

L'activité photosynthétique des jeunes feuilles est supérieure à celle des feuilles âgées et l'extinction de la lumière est de plus en plus forte au fur et à mesure que la feuille se développe. En effet, pour une même énergie reçue au sommet du couvert, l'énergie reçue par les feuilles inférieures représente une part de plus en plus faible de totale.

On admet que cette baisse de l'efficacité A_j de la photosynthèse journalière, intervient après la nouaison du 1^{er} fruit (donc après que la somme des températures efficace ait dépassé le totale \sum_2) et qu'elle est égale à 1 au début et tend vers zéro au moment de la sénescence (la somme de température efficaces atteint \sum_4).

Le rapport $\frac{\sum_j}{\sum_{j_{\max}}}$ fixe le stade du développement de la plante.

$$A_j = 1 - \frac{\sum_j - \sum_2}{\sum_4 - \sum_2} \quad (2.3)$$

2.2.2.5 Influence du taux de recouvrement

Si l'on suppose le couvert totalement fermé, toute l'énergie lumineuse sera absorbée. En début de végétation, le pourcentage de surface couvert par végétation (K_j) est faible puis à mesure que le végétale croît, elle tend vers un maximum défini comme le taux de couverture (K_{\max}), l'évolution du développement végétale suit approximativement une loi liant K_j à K_{\max} et à indice climatique intégrant degré jour efficace ($\theta > \theta_0$) et somme de l'énergie solaire reçue (G).

$$K_j = K_{\max} \left(1 - e^{-a_c \sum_j (\theta - \theta_0) \sum_j G_j} \right) \quad (2.4)$$

Avec a_c : Coefficient spécifique relatif au couvert.

L'assimilation nette nyctémérale $P_n(e)_j$ quantité effectivement fixé à la fin de jour (J) est estimée journallement à partir de la relation :

$$K_j = K_{\max} \left(1 - e^{-a_c \sum_j (\theta - \theta_0) \sum_j G_j} \right) \quad (2.5)$$

Avec a_c : coefficient spécifique relatif au couvert.

L'assimilation nette nyctémérale $P_n(e)_j$ quantités effectivement fixé à la fin de le jour (J)

$$P_n(e)_j \left[\sum_{n=0}^{n=H_j} P_n(n,J) \right] \omega_j \varepsilon_j K_j A_j$$

est estimée journallement à partir de la relation :

(2.6)

2.2.2.6. Floraison-nouaison, Taux de grossissement

La floraison et la nouaison pouvant être caractérisées et déterminées par la somme de température $\sum(\theta - \theta_0)$, il semble évident que pour toute somme de température supérieure à, $\sum(\theta - \theta_0)$ une certain fraction de l'assimilation nette totale nyctémérale sera orientée vers l'édification de la masse des fruits. Cette fraction évolue comme le rapport de la masse actuelle des fruits à maturité. Ce rapport, ou taux de grossissement des fruits, évoluerait selon une loi comparable à celle régissant le taux de couverture du sol, mais ici la lumière n'intervient pas directement :

$$K_{fj} = K_{f \max} \left[1 - \exp \left(-a_f \sum_{i=J_f}^{i=J} (\theta - \theta_0) \right) \right]$$

(2.7)

Avec :

- J_f : jour de la floraison
- K_{fj} : % poids de jour J après la floraison
- K_{fmax} : poids de la fin de maturation
- a_f : coefficient à déterminer

La maturation et la récolte interviendront lorsque la somme des températures qui leur est caractéristique sera réunie. La relation qui traduit le taux de transfert des assimilés vers les fruits, peut être appliquée à l'ensemble de fruit lorsqu'il ne s'agit que de quantifier la masse totale d'assimilés affectés aux fruits, à la fin cycle culturale. Mais si l'on s'intéresse à la description de la courbe de maturation. On doit tenir compte du mode de répartition des assimilés entre différents fruits en cours de formation ou de maturation, ce mode de

répartition sera défini par des relations de même type, appliquées séparément à chaque inflorescence ou chaque fleur. Naturellement le passage des masses de CO_2 calculées aux masses de fruits frais correspondantes tiendra compte des relations matière sèche / CO_2 et de l'humidité pondérale des fruits à maturité.

2.2.3. Association des différents éléments de calcul

A l'aide des équations précédemment définies .On calcule la masse de matière végétale obtenue par m de serre, à partir de la première nouaison(N_i), une partie de cette matière migre vers les fruits. Lorsque le premier bouquet atteint la date R_i définie (\sum), il y a maturation du fruit, cela permet de construire la courbe de rendement agricole.

2.2.4. Recherche de la valeur des paramètres

On admet que les plantes ont été conduites dans de bonnes conditions sanitaires et d'alimentation hydrique et minérale, la richesse du rayonnement d'origine solaire en rayonnement visible photo synthétiquement actif estimée à 50%. La concentration moyenne de l'air en CO_2 , dans un couvert végétale et estimée à 0.03% ($5.47 \cdot 10^{-4} \text{Kg.m}^{-3}$) et l'hygrométrie est sensée ne pas perturber l'assimilas.

Les paramètres à déterminer sont nombreux et demandent un travail assez lourd d'essais, Les observations et mesures peuvent être faites sur un cycle normal de culture soit en plein champ, sous serre soit sur un échantillon de culture (plante ou partie de plante) au laboratoire. A partir de divers essais effectués à l'institut nationale agronomique ou sur la station CTIFL de Balandran, France), et complété par des valeurs trouvées dans la bibliographie, nous pouvons dresser la liste des valeurs numériques que prennent les différente variables pour la variété de tomate (LUCA) Pour :

$$a = 6.34 \cdot 10^{-8} \text{Kg.joule}^{-1}, b = 5.82 \cdot 10^{-2} \text{m.s}, a_f = 0.01^\circ\text{C}^{-1}, I_0 = 5 \text{ Wm}^{-1}, a_c = 1.4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{joul}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$$

- Matière sèche/ $\text{CO}_2 = 0.72$.
- $\theta_0 : 7.5^\circ\text{C}$
- $\sum(\theta - \theta_0)$ entre feuille étalées : $50^\circ\text{C} \times \text{jour}$

- $\sum(\theta - \theta_0)$ entre fleurs nouées : 45°C x jour
- $\sum(\theta - \theta_0)$ nouaison du 1^{er} fruit : 750°C x jour
- $\sum(\theta - \theta_0)$ maturation du 1^{er} fruit : 1420°C x jour
- $\sum(\theta - \theta_0)_{\max}$: 2200°C x jour

$$C_0 = 1.28 \cdot 10^{-2} \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad K_{\max} = 0.7 \quad \lambda = 3.7 \times 10^{-2} \cdot \text{C}^{-1} \quad \mu = 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{S}^{-1}$$

- Matière fraîche/Matière sèche : 22.

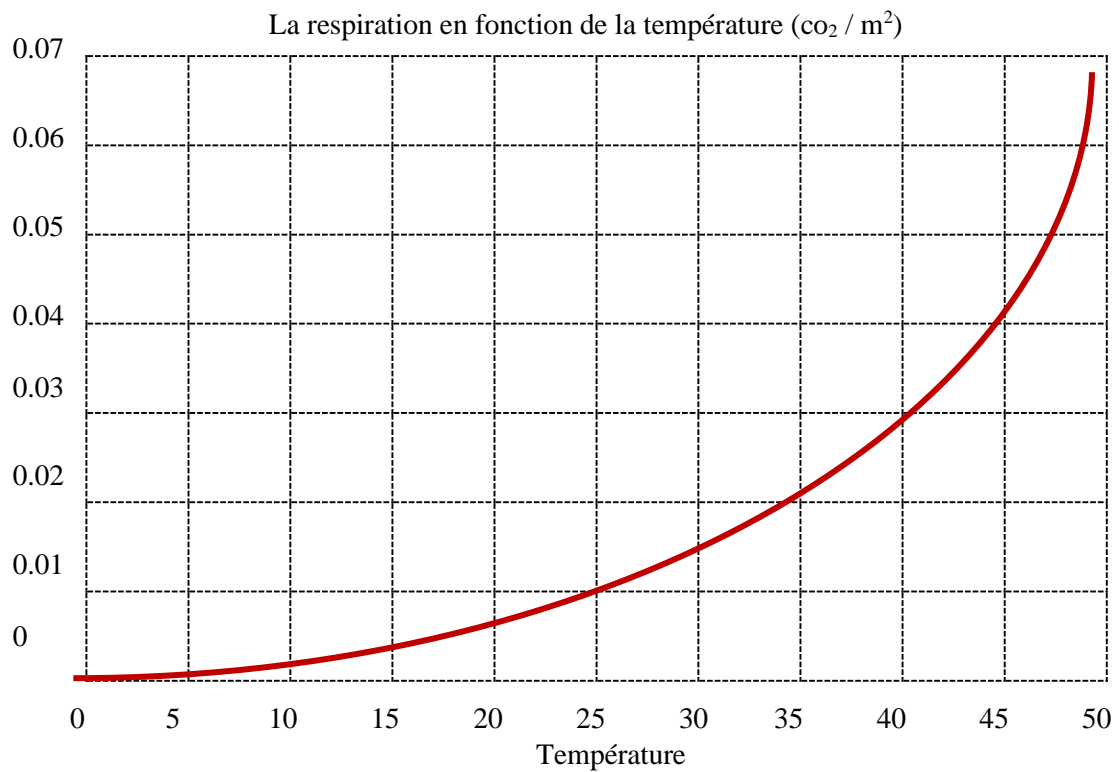


Fig. 2.2. Evolution de la respiration en fonction de la température

2.2.5. Organigramme

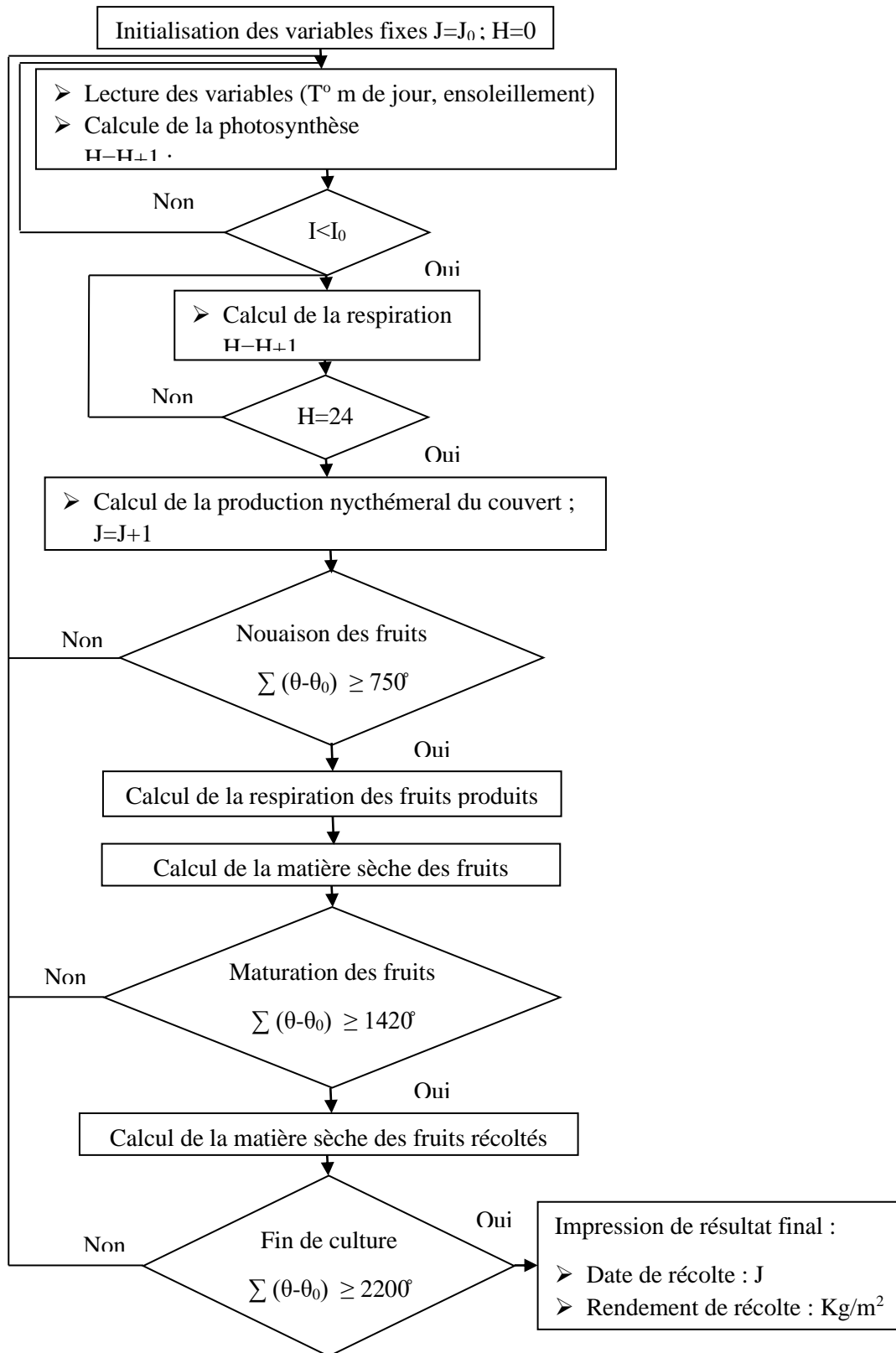


Fig. 2.3. Organigramme du modèle de la croissance de la plante

2.3. Résultats et discussion

L'algorithme de la modélisation de la plante appliquée aux données obtenues à station météorologie, Belkhir/Guelma, Algérie, Février et Mars, 2012 au pas de 3 heures, consignées dans les tableaux ci-dessous, donne le résultat représenté par la fig. 2.4.

L'heure	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
Rg(w/m ²)	0.00	0.00	0.00	150.00	305.00	111.00	0.00	0.00
T.int(°C)	14.22	14.22	14.12	14.17	21.50	15.12	14.10	14.13

Tableau 2.1. Les données météorologies sur 24 heures

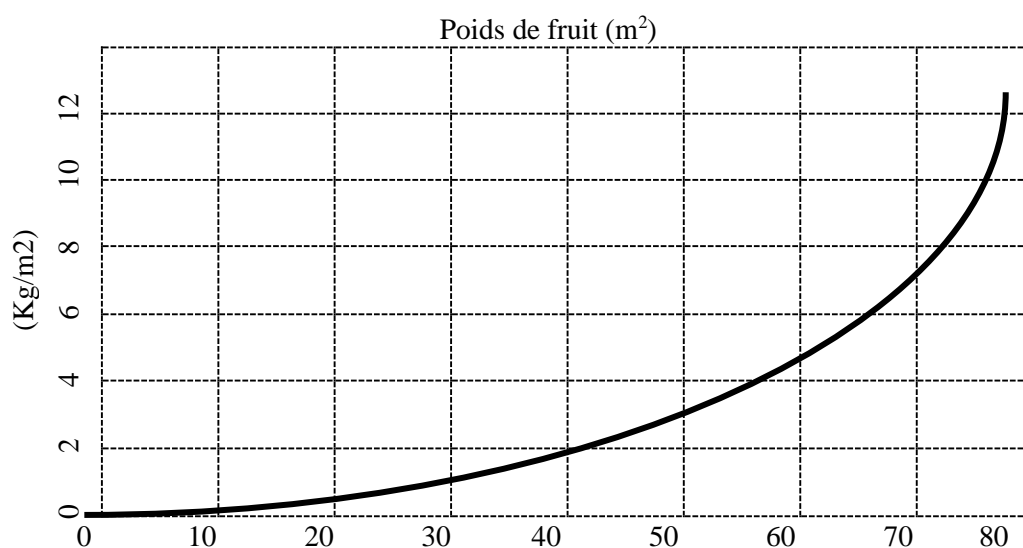


Fig. 2.4. Evolution du rendement de la plante en fonction du temps

Conclusion

Le modèle de la croissance de la plante permet d'évaluer le rendement et le calendrier de la production potentiel dans le cas particulier de variété étudiée.

Cependant des aspects de la vie du végétal sont schématisés car très difficiles à connaître et à traduire sous forme mathématique simple. Les objectifs de modélisation de croissance de la plante dans le cadre de gestion informatisée d'une serre agricole sont :

- fournir des outils d'aide à la décision (des consignes) utilisables par les producteurs (Objectif à court terme),

- fournir des outils d'optimisation en continu totalement intégrés dans les ordinateurs de gestion des serres (objectif à long terme).
- simuler l'architecture de la croissance de la plante (Ramires .A, Rodriguez.F et Berenguel. M.2003).

CHAPITRE 3. Modélisation et commande neuro-flou d'une serre agricole

INTRODUCTION

Le contrôle d'un environnement d'une serre est un art, qui ne peut être mené à perfection, que par un expert agricole. D'où la tendance à appliquer les systèmes d'approche experts au contrôle de l'environnement. Les travaux dans les années 80, basés sur cette approche suggèrent tous, qu'extraire une base de connaissance au près d'un expert agricole est une tâche pénible et complexe, et par-dessus coûteuse (Bounamma, 2008). L'un des problèmes avec l'approche système, est que la base de connaissance doit être exprimée en termes de règles de base simples, qui pourront être ensuite combinées ultérieurement dans une structure plus complexe. La spécification des ces règles est souvent une procédure subjective, qui peut ne pas refléter les vraies réponses de l'expert. Et l'autre problème, est que le temps de réponse du système peut devenir très grand avec la taille de l'ensemble des règles. Une alternative pour extraire la connaissance d'une manière objective, à partir des données collectées sur site peut être accomplie par un réseau neuro-floue. Cette approche est aussi une approche de l'intelligence artificielle, ayant la propriété de la logique floue pouvant intégrer les concepts qualitatifs ou des valeurs incertaines d'une part, et les propriétés du modèle connexionniste permettant d'optimiser les règles floues et les sous ensembles flous d'autre part. Elle permet de réaliser une commande fiable de la serre.

3.1. Les réseaux neuro-floue

Par nature le réseau neuro-floue est un réseau de neurones multi-couches, (en générale à trois couche, où la première couche représente le vecteur d'entrées, la troisième couche représente le vecteur de sortie et entre ceux deux couches se trouve la couche des règles) (fig. 3.1).

Alors on peut dire que le réseau de neuro-floue est une version (*fuzzifiée*) de réseau de neurone multi-couches.

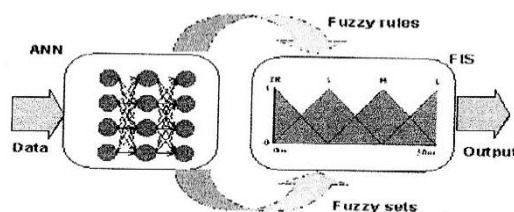


Fig.3.1. Modèle neuro-floue

3.1.1. Rappel sur les méthodes connexionnistes :

3.1.1.1. Les réseaux de neurones

Un neurone formel correspond à un processeur extrêmement basique (simulé sur un ordinateur ou réalisé sur un circuit intégré) qui imite de manière rudimentaire la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique. La première version du neurone formel a été proposée par W.S. McCulloch et W. Pitts en 1943. Il s'agit d'un automate binaire qui effectue une somme pondérée de ses entrées, appelée potentiel, puis compare ce potentiel à un seuil (généralement nul) : si le potentiel est supérieur, la sortie est +1 et le neurone est actif, s'il est inférieur, la sortie est -1 et le neurone est inactif (Isabelle. R, 1996). Aujourd'hui, il existe différents autres types de neurones, mieux adaptés aux tâches de traitement du signal ou de classification. Leur sortie ne se limite pas au signe de leur potentiel, mais est plutôt une fonction f non linéaire et dérivable de ce potentiel, telle qu'une tangente hyperbolique, etc. Cette fonction est appelée la fonction d'activation du neurone (Fig. 3.2).

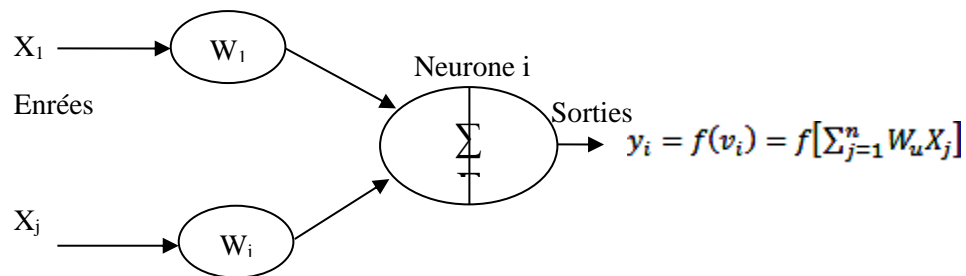


Fig.3.2. le neurone formel

3.1.1.2. Les fonctions d'un réseau de neurone

Le tableau ci-dessous résume les diverses catégories couramment employées de fonctions de transfert, incluant leurs équations mathématiques ainsi que leurs dérivées :

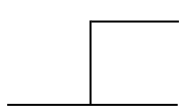

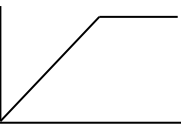
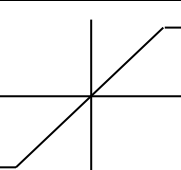
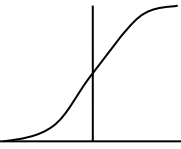
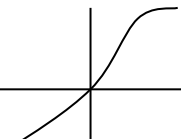
Catégorie	Type	Equation	Allure	Dérivée
Seuil	Binaire (fonction de Heaviside)	$F(x) = 1$ si $x > 0$ $F(x) = 0$ si $x \leq 0$		—
	Signe	$F(x) = 1$ si $x > 0$ $F(x) = -1$ si $x \leq 0$		—
Linéaire	Saturé positif	$F(x, k) = 0$ si $x < 0$ $F(x, k) = 1$ si $x \geq 1/k$ $F(x, k) = k \cdot x$ sinon		$F(x, k) = 0$ si $x < 0$ $F(x, k) = 0$ si $x \geq 1/k$ $F(x, k) = k \cdot x$ sinon
	Saturé symétrique	$F(x, k) = -1$ si $x < -1/k$ $F(x, k) = 1$ si $x \geq 1/k$ $F(x, k) = k \cdot x$ sinon		$F(x, k) = 0$ si $x < -1/k$ $F(x, k) = 0$ si $x \geq 1/k$ $F(x, k) = k \cdot x$ sinon
Sigmoide	Positive (type logistique)	$F(x, k) = 1/(1+e^{-kx})$		$F(x, k) = k / (2 + e^{kx} + e^{-kx})$
	Symétrique (type tanh)	$F(x, k) = [2/(1+e^{-kx})] - 1$		$F(x, k) = 2.k / (2 + e^{kx} + e^{-kx})$

Tableau. 3.1 : Les fonctions de transfert d'un réseau de neurone

3.1.1.3. Apprentissage d'un réseau de neurone

➤ L'apprentissage supervisé

Dans le cadre de l'apprentissage supervisé, l'utilisateur détient des résultats de référence précis qu'il souhaite reproduire à travers le système en enseignant les réponses à fournir. Grâce à ce processus, le réseau est en mesure d'évaluer la disparité entre ces résultats et les résultats souhaités, et d'ajuster les poids si nécessaire. L'utilisateur dispose des résultats finaux et peut ainsi comparer les réussites et les échecs à travers l'ensemble du réseau. Il s'agit donc de déterminer des sorties correctes à partir d'entrées données (Simon B, 2004).

➤ **L'apprentissage non supervisé** (*automatique*)

Dans ce processus, le réseau lui-même ajuste les poids des liens au sein du réseau à l'aide de techniques d'analyse de données, en se basant sur des critères internes. En réalité, le réseau tente d'identifier de manière autonome les relations existantes entre les attributs (Simon B, 2004).

L'algorithme d'apprentissage fréquemment utilisé est l'algorithme de rétropropagation du gradient, qui permet d'ajuster les coefficients de pondération des neurones pour obtenir le comportement souhaité. Il implique de présenter l'état du système à connaître à la couche d'entrée, de transmettre les réponses de couche en couche, puis de comparer la réponse obtenue à la couche de sortie avec celle souhaitée. La différence est propagée en sens inverse jusqu'à l'avant-dernière couche, en ajustant cette erreur en fonction de l'importance des connexions pour la configuration donnée, et ce processus se répète de manière itérative.

3.1.1.4. Algorithme de rétro-propagation du gradient

L'un des algorithmes d'apprentissage les plus basiques pour les réseaux de neurones multicouches est l'algorithme de rétropropagation du gradient. L'idée fondamentale derrière cet algorithme est de minimiser une distance quadratique en effectuant une descente de gradient dans l'espace des poids. Son fonctionnement repose sur le calcul des dérivées partielles.

ETAPE1 : initialiser $W_{ijk}(0)$ à faible valeur aléatoire

(W_{ijk} : est le poids de la connexion entre le neurone i de la couche $k-1$ et le neurone j de la couche K à l'instant t).

ETAPE2 : présentation d'un couple (entrée, sortie désirée).

Présenter un vecteur de valeur continues (x_1, x_2, \dots, x_n) et un vecteur de sortie désirée (d_1, d_2, \dots, d_m).

Où : N : nombre de neurones d'entrée.

M : nombre de neurones de sortie.

ETAPE3 : calcul des états de sortie

$$\mathbf{a}_{ik}(t) = \sum_{j=0}^{n_{k-1}} \mathbf{W}_{ij}(t) y_{j, k-1}(t) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y}_{ik}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{a}_{ik}(t)) \quad (3.2)$$

$\mathbf{a}_{ik}(t)$: est l'activation du neurone i de la couche K à l'instant t .

$\mathbf{y}_{ik}(t)$: est la valeur de sortie du neurone i de la couche K à l'instant t .

n_{k-1} : est le nombre de neurones de la couche $K-1$.

\mathbf{F} : est la fonction d'activation (fonction de transfert).

ETAPE 4 : calcul des gradients associés aux unités de la couche de sortie

$$g_{ik}(t) = -\frac{\partial E(t)}{\partial a_{ik}} = f'(a_{ik}(t))(d_i(t) - y_i(t)) \quad (3.3)$$

ETAPE 5 : Calcul des gradients des autres unités. En appliquant couche par couche

$$g_{ik}(t) = f'(a_{ik}) \sum_{n=0}^{n_{R+1}} W_{mik+1}(t) \cdot y_{mk+1} \quad (3.4)$$

ETAPE 6 : Mettre à jours les poids

$$W_{ijk}(t+1) = W_{ijk}(t) + \Delta W_{ijk}(t) + \eta \delta_j x_j \quad (3.5)$$

η : Le pas d'adaptation « learning rate »

δ_j : terme d'erreur de nœud j .

$$\delta_j = y_d - y_j$$

ETAPE 7 : Si le test de convergence n'est pas satisfait aller à l'étape 2.

3.2. Architecture du système d'inférence neuro-floue adaptative (ANFIS) :

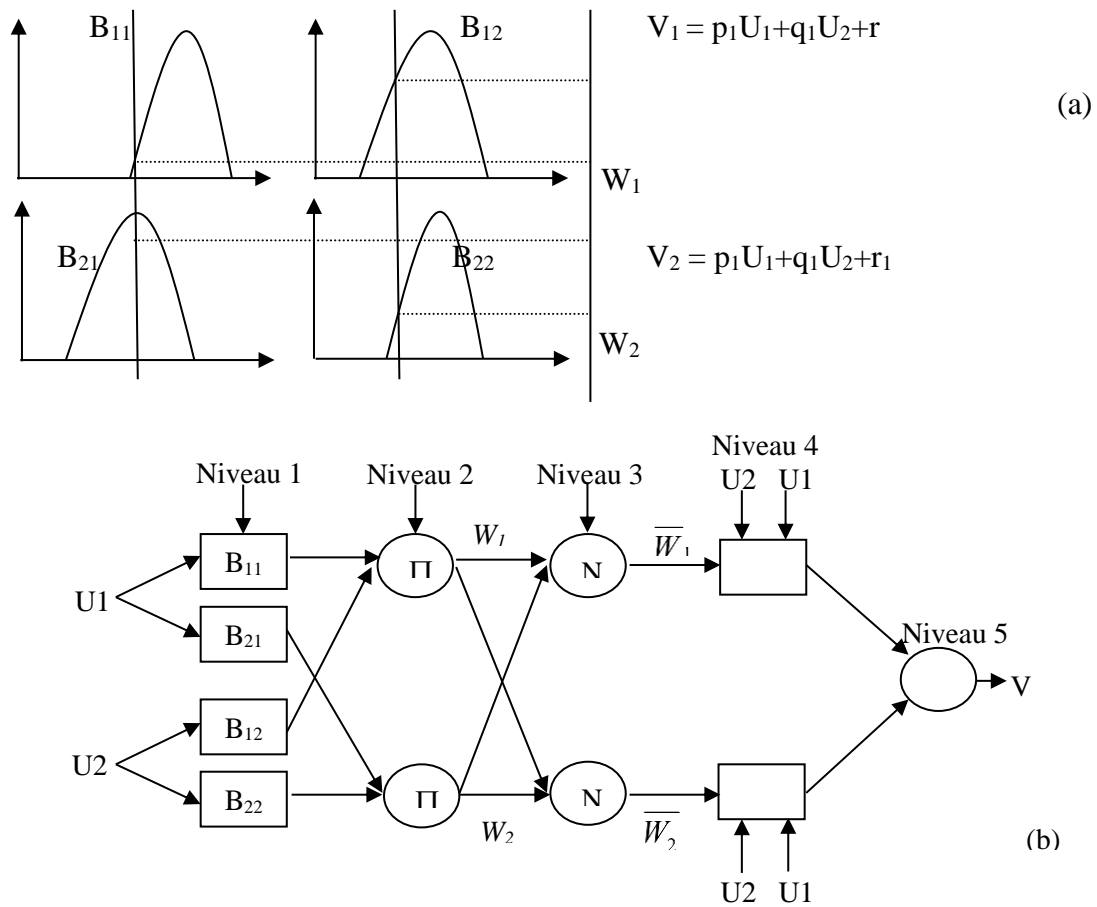


Fig. 3.3. (a) modèle flou de première ordre de Sugéno avec 2-entrées et 2- règles, (b) architecture de ANFIS équivalent

Pour un système MISO (2-entrées, 1-sortie), le système d'inférence floue de premier ordre de Sugéno avec deux règles peut se décrire comme suit :

If u_1 is B_{11} AND U_2 is B_{12} THEN $V_1 = p_1 u_1 + q_1 u_2 + r_1$

If u_1 is b_{21} AND u_2 is B_{22} THEN $V_2 = p_2 u_1 + q_2 u_2 + r_2$

L'architecture de ANFIS équivalente (comme l'illustre la fig. 3.3) est un réseau de neurones à 5-couches, où les fonctions de transfert des nœuds de la même couches sont identiques (Chuen – Tsai Sun, Jyh-Shing Roger Jang, 1995).

➤ **Couche 1**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud adaptatif, où la sortie de ce nœud est définie par :

$$a_{i,1} = B_{1i}(U_1) \quad \text{pour } i = 1, 2 \quad (3.6)$$

$$a_{i,1} = B_{2i}(U_2) \quad \text{pour } i = 2, 3 \quad (3.7)$$

Avec : $B_{1i}(U_1)$ est le degré d'appartenance de U_1 à sous ensemble flou B_{1i} .

$B_{2i}(U_2)$ est le degré d'appartenance de U_2 à sous ensemble flou B_{2i} .

➤ **Couche 2**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud fixe, où la sortie de cet nœud est définie par :

$$A_{i,2} = w_i = B_{1i}(U_1) * B_{2i}(U_2), \quad i = 1, 2 \quad (3.8)$$

Avec W_1 : représente l'agrégation floue des antécédents dans la règle 'i'.

On peut utiliser l'opérateur t-norme, ou bien AND connective comme fonction de nœud dans cette couche.

➤ **Couche 3**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud fixe, ou la sortie de cet nœud est définie par :

$$a_{i,3} = \overline{w}_i = \frac{w_i}{w_i + w_2} \quad (3.9)$$

Avec \overline{w}_i : est une normalisation de l'agrégation floue.

➤ **Couche 4**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud adaptatif, où la sortie est définie par :

$$A_{i,4} = \overline{w}_i v_i = \overline{w}_i (p_i u_i + q_i u_i + r_i), \quad (3.10)$$

Avec (p_i, q_i, r_i) l'ensemble de paramètres de modèle flou de Sugéno.

➤ **Couche5**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud fixe, où la sortie de cet nœud est définie par :

$$a_{i5} = \frac{\sum_i w_i v_i}{\sum_i w_i} \quad (3.11)$$

Pour le même modèle de Sugéno, on peut présenter une autre architecture (ANFIS) équivalent par un réseau de neurone à 4-couches (Fig. 3.4).

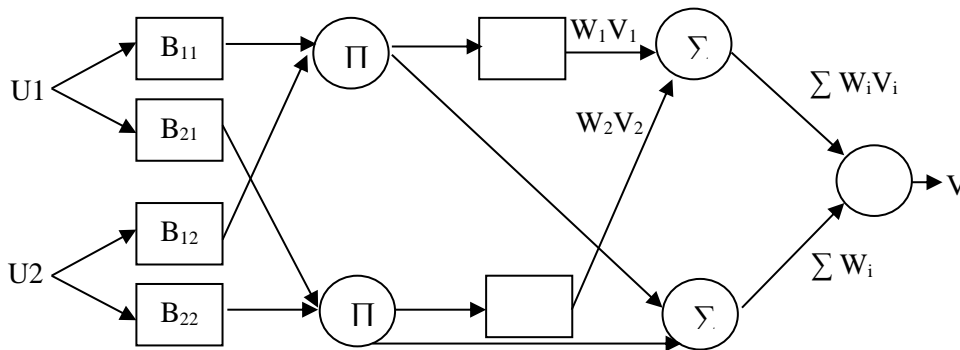


Fig. 3.4. autre architecture de ANFIS équivalente à un modèle flou de premier ordre de Sugéno avec 2-entrées et 2-règles

3.3. Algorithme de moindre carré :

Soit la fonction : $V = F(U, S)$ (3.12)

Avec U : l'ensemble des variables d'entrée.

S : l'ensemble des paramètres.

S'il existe une fonction linéaire H , tel que $H \circ F$ linéaire par rapport aux sommes des éléments de S , alors on peut identifier ces éléments par la méthode de moindre carré.

Si on peut décomposer S en deux ensembles : $S = S_1 + S_2$ (3.13)

Tel que : $H \circ F$ est linéaire par rapport à S_2

$$D'après (3.12): H(V) = H \circ F(U, S) \quad (3.14)$$

Si on donne des valeurs à S_1 à l'équation (14), on obtient l'équation matrice suivante :

$$A\theta = B \quad (3.15)$$

Où : θ représente le vecteur des paramètres inconnus dans S_1

Cette équation représente le problème standard de moindres carrés. Et la meilleure solution θ^* est l'estimateur de moindres carrés :

$$\theta^* = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (3.16)$$

Où : A^T la matrice transposée de A .

$(A^T A)^{-1} A^T$ le pseudo inverse de la matrice A (si : $(A^T A)^{-1}$ est non singulière)

On peut appliquer la formule de moindres carrés récursive. Et θ se décrit de la forme suivante :

$$\left. \begin{aligned} \theta_{i+1} &= \theta_i + S_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T \theta_i) \\ S_{i+1} &= S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}} \end{aligned} \right\} \quad I=0,1,\dots,P-1 \quad (3.17)$$

Avec les conditions initiales : $\theta_0 = 0$, $S_0 = \gamma I$ où γ : est un nombre large positif.

3.4. Apprentissage d'un réseau neuro-flou

3.4.1. Algorithme d'apprentissage hybride (rétro-propagation du gradient et moindres carrés)

On peut remarquer, d'après l'architecture de ANFIS représentée dans (fig. 3.3), si on fixe les paramètres d'antécédent, la sortie finale est une combinaison linéaire de paramètres de conséquents.

$$\begin{aligned} V &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} V_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} V_2 \\ &= \bar{w}_1 v_1 + \bar{w}_2 v_2 \\ &= (\bar{w}_1 U_1) p_1 + (\bar{w}_1 U_2) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 U_1) p_2 + (\bar{w}_2 U_2) q_2 + (\bar{w}_2) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Avec $P_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2$ sont les paramètres des conséquents.

Dans le cadre de l'apprentissage hybride, les sorties des nœuds sont propagées en avant jusqu'à la couche 4, et les paramètres correspondants sont déterminés à l'aide de la méthode des moindres carrés. En revanche, lors de la deuxième étape, les signaux d'erreur se propagent en sens inverse (rétropropagation), et les paramètres antérieurs sont identifiés au moyen de la méthode de la descente de gradient. Les détails de l'algorithme d'apprentissage hybride sont résumés dans le tableau suivant.

	Propagation vers l'avant	Propagation vers l'arrière (rétro-propagation)
Les paramètres d'antécédent	Fixe	Descente de gradient
Les paramètres de conséquent	Moindre carré	Fixe
	Les sorties de nœuds	Les signaux des erreurs

Tableau. 3.2 : les étapes d'algorithme d'apprentissage hybride

3.5. Contrôle neuro-floue

L'objectif d'un contrôle automatique est de maintenir la sortie de processus au voisinage de valeurs de consigne imposées par l'utilisateur. Et parmi les méthodes les plus utilisées dans le contrôle par un réseau neuro-floue, est celle de la commande par apprentissage direct (apprentissage à partir de l'expérience humaine) et commande par modèle inverse (apprentissage à partir de modèle).

3.5.1. Commande par apprentissage direct

La plus part du temps, le contrôleur imité est l'expert humain qui peut commander le processus d'une manière satisfaisante. Le concept d'imiter un expert humain est l'intention originale de contrôleurs flou dont le but final est de remplacer l'expert humain habituellement

peut récapituler ses actions de commande par un ensemble de règles sous forme IF-THEN. Maintenant avec l'approche neuro-floue et les algorithmes d'apprentissage, nous pouvons d'avantage plus loin tirer profit de l'information numérique (les données d'entrée-sortie) et optimiser les règles floues d'une manière systématique.

3.5.2. Commande par modèle inverse neuro-flou

Le développement d'un système de commande neuro-floue à rétroaction implique deux étapes distinctes :

- Une phase initiale d'apprentissage au cours de laquelle les coefficients du réseau correcteur sont estimés.
- Une phase opérationnelle où le correcteur, dont les coefficients sont prédéfinis, est utilisé pour guider le processus.

3.5.2.1 Phase d'apprentissage

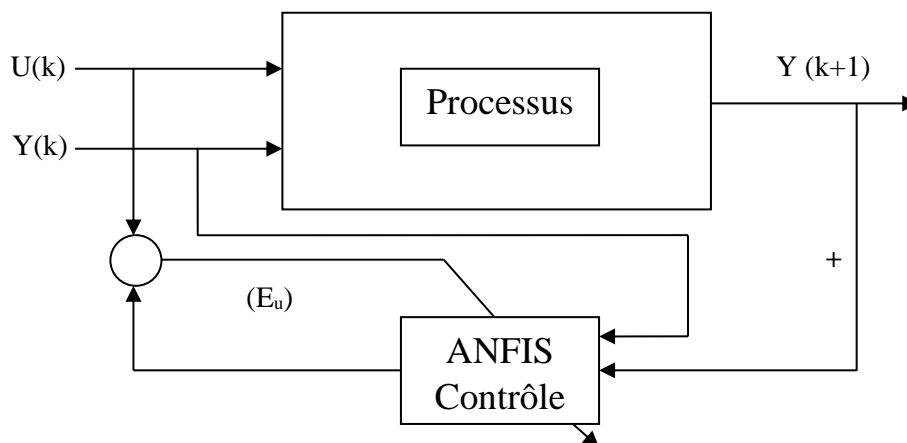


Fig. 3.5. Identification des paramètres du contrôleur

On applique au modèle des séquences aléatoires de commande et on reçoit les sorties correspondantes à partir de modèle. La fig. 3.5 représente l'apprentissage de modèle inverse à partir de modèle direct.

De la même manière que pour la modélisation, l'objectif de l'apprentissage est de régler les coefficients du réseau correcteur de manière à ce que les sorties du modèle inverse soient le plus proche possible des sorties désirées ($u(k)$).

3.5.2.2. Phase d'utilisation

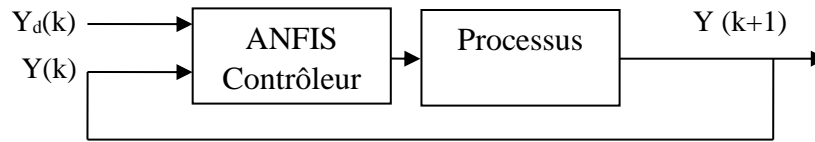


Fig. 3.6. Phase d'utilisation du contrôleur

Après l'étape d'apprentissage, le contrôleur est appliqué au processus. La solution la plus basique implique une simple boucle avec ce dernier (voir Figure 3.6). Dans de tels systèmes de commande, le signal de rétroaction est représenté par la sortie mesurée y_p du processus.

3.6. Contrôle de l'environnement interne de la serre

Les systèmes de production en serres sont devenus de plus en plus sophistiqués, mais également excessivement coûteux. En conséquence, les producteurs de serres qui souhaitent maintenir leur compétitivité doivent optimiser leurs investissements en maîtrisant parfaitement les conditions de production (Bounaama, 2008). De nouvelles techniques de gestion climatique ont émergé, utilisant notamment l'intelligence artificielle pour élaborer des modèles mathématiques destinés à la régulation du climat (Bounaama, 2008). À partir de cette observation, notre étude vise principalement à examiner la modélisation Neuro-Floue d'un système non linéaire. Les tests sont réalisés sur une série de données expérimentales collectées sur le site de BENOMOR, une serre horticole de pépinières de tomates à Guelma (Algérie) pendant les mois de février et mars 2012. Le résultat obtenu reflète de manière précise la structure de la serre et peut être employé pour la régulation en temps réel (Draoui, 1994).

Au cours des deux dernières décennies, d'importants progrès ont été réalisés dans l'étude et la modélisation du comportement hydrique des serres horticoles. Les défis liés au contrôle de la déshumidification par l'aération et le chauffage, à l'humidification et à l'ombrage estival, ainsi qu'au contrôle simultané de l'humidité et de la température doivent être abordés en se basant sur les bilans climatiques de la serre. Dans cette optique, nous avons développé un modèle Neuro-Flou de bilan d'humidité et de température pour la serre. Ce modèle permet de caractériser le fonctionnement du système complexe qu'est la serre. L'identification, au cœur de cette démarche, consiste en la recherche d'une représentation mathématique minimisant les écarts entre le système réel et le système modélisé.

Le développement des plantes est principalement influencé par les variables climatiques environnementales. La serre, en tant qu'environnement clos où les variables climatiques peuvent être contrôlées, offre un cadre idéal pour la gestion de la croissance des plantes. Elle doit non seulement créer des conditions propices à la croissance, mais aussi permettre une certaine flexibilité dans le calendrier de production, en favorisant la précocité et l'étalement des récoltes. Afin d'atteindre cet objectif, un modèle précis et fidèle représentant le comportement de la serre s'avère plus que nécessaire.

3.6.1. Bilan climatique d'une serre horticole

3.6.1.1. Modèle de connaissance

Les serres représentent des systèmes complexes et dynamiques qui sont influencés par les conditions environnementales extérieures, la structure de la serre ainsi que les effets des variables de contrôle telles que l'extracteur et le chauffage. Leur comportement peut être défini à l'aide de systèmes d'équations non linéaires. Après intégration et formulation récurrente entre les instants de temps n et $n+1$, un modèle de connaissance peut être obtenu en utilisant les équations d'état suivantes (Draoui, 1994) :

Humidité de l'air interne de la serre :

$$H_i(n+1) = H_i(n) \exp(-\zeta \Delta t) + (1 - \exp(-\zeta \Delta t)) \cdot \left(\frac{rsB\gamma\tau}{\xi} \frac{\chi}{\xi} \frac{\gamma s B}{\zeta} \frac{\gamma s}{\zeta} \right) \left(R_g H_e T_i \phi_l \right)^T \quad (3.19)$$

Température de la masse simulée (le sol) à l'intérieur de la serre :

$$T_{mi}(n+1) = T_m(n) \exp\left(-\frac{\Delta}{\tau} t\right) + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta}{\tau} t\right)\right) \cdot \left(\frac{\alpha h + B\gamma}{h(K+K_s)}, \frac{v}{h(K+K_s)}, 1, \frac{l}{(K+K_s)}, \frac{K_l}{(K+K_s)}, \frac{l}{(K+K_l)} \right) \theta \quad (3.20)$$

Et la température de l'air interne de la serre :

$$T_i(n+1) = \frac{h}{\gamma} T_m(n+1) + \left(\frac{v-h}{v} \frac{\alpha}{v} 0 \frac{l}{v} \frac{K_l}{v} \frac{-K_l}{v} \right) \theta \quad (3.21)$$

3.6.2 Approches neuronales appliquées aux systèmes flous

3.6.2.1. Modèle comportemental

Malheureusement, le modèle de comportement obtenu présente des défis de contrôlabilité en raison de sa nature à variations temporelles et de sa non-linéarité (B. Kosko, 1994). L'utilisation des méthodes neuro-flou, qui sont devenues très populaires pour la résolution de problèmes complexes (R. Babuška, 1996), offre la possibilité de prendre en compte toute la complexité de la serre en intégrant des concepts qualitatifs empiriques et experts (J.S.R. Jang, 1993), tout en générant un modèle de comportement adapté au contrôle. Si une base de connaissances est formulée sous la forme de règles linguistiques, il est possible de construire un système d'inférence flou. De plus, en présence de données expérimentales, l'utilisation de neurones artificiels peut être envisagée. Pour élaborer un système d'inférence flou, il est nécessaire de définir les ensembles flous, les opérateurs flous et la base de connaissances. En revanche, pour construire un réseau de neurones artificiels, l'utilisateur doit spécifier l'architecture et l'algorithme d'apprentissage. Une analyse approfondie révèle que ces deux approches semblent complémentaires, et l'élaboration d'un système complet devrait combiner ces deux concepts. La littérature propose une variété de systèmes neuro-flous, notamment les systèmes neuro-flous coopératifs, concurrents, et les systèmes dits hybrides ou neuro-flous adaptatifs. Dans ces derniers, les systèmes flous sont représentés sous forme de structures en réseau, imitant ainsi les réseaux neuronaux artificiels (ANN) (Bounaama, 2008).

3.6.2.2. Systèmes d'inférence neuro-flou adaptatifs

Les systèmes d'inférence neuro-flou adaptatifs (ANFIS) représentent une approche hybride qui combine l'inférence floue de Takagi-Sugeno. La structure de l'ANFIS est composée de cinq couches, illustrées dans la (fig. 3.7). Dans la première couche cachée, les variables d'entrée subissent un processus de "fuzzification", tandis que les opérateurs de type T-norm calculent la partie prémisse des règles dans la deuxième couche cachée. La troisième couche cachée est dédiée à la normalisation des poids des règles, suivie de la quatrième couche cachée, où les paramètres des parties conclusion des règles sont déterminés. Enfin, la couche de sortie calcule la somme de tous les signaux provenant de la quatrième couche (J.S.R. Jang et al., 1995).

Les systèmes ANFIS disposent de paramètres adaptables qui englobent :

- ❖ Les paramètres de la fonction d'appartenance des parties prémisses [a, b, c, d].
- ❖ Les paramètres polynomiaux [p, q, r], également désignés comme les paramètres de la partie conclusion.

Leur apprentissage est réalisé à travers l'algorithme de descente de gradient (rétropropagation) pour optimiser les paramètres des parties prémisses, tandis que l'algorithme des moindres carrés est utilisé pour résoudre les paramètres de la partie conclusion. Cette démarche vise à minimiser l'erreur E (J.S.R. Jang, 1993).

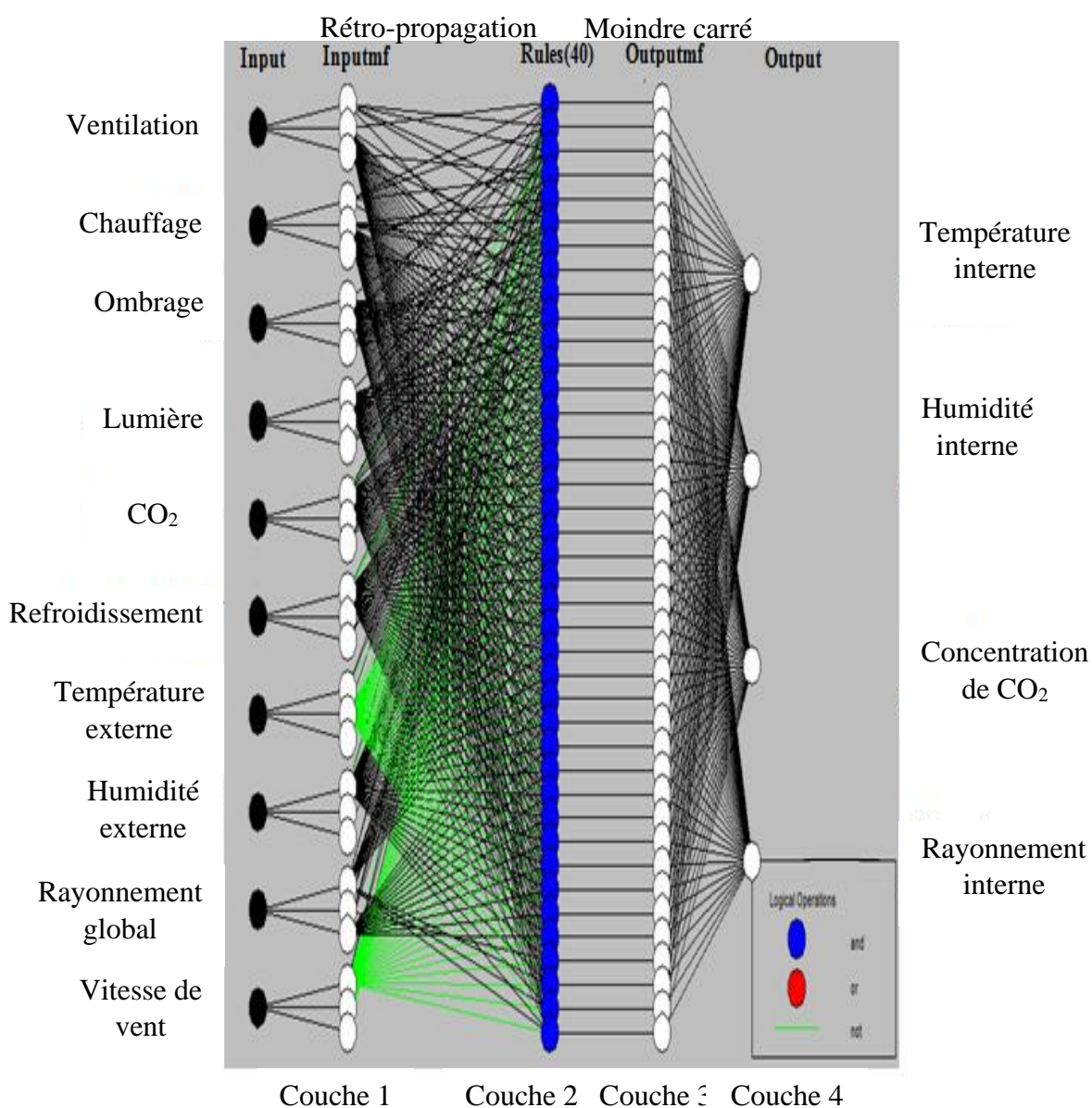


Fig. 3.7. Structure du model ANFIS de la serre

Dix variables de caractéristiques, ventilation, chauffage, ombrage, lumière artificielle, injection de CO₂, buée / refroidissement, la température extérieure, l'humidité extérieure, rayonnement global et la vitesse du vent, sont sélectionnés comme entrées du ANFIS. Trois fonctions d'appartenance trapézoïdales sont assignées à chaque variable linguistique. Le modèle ANFIS suggéré est montré dans (Fig. 3.8).

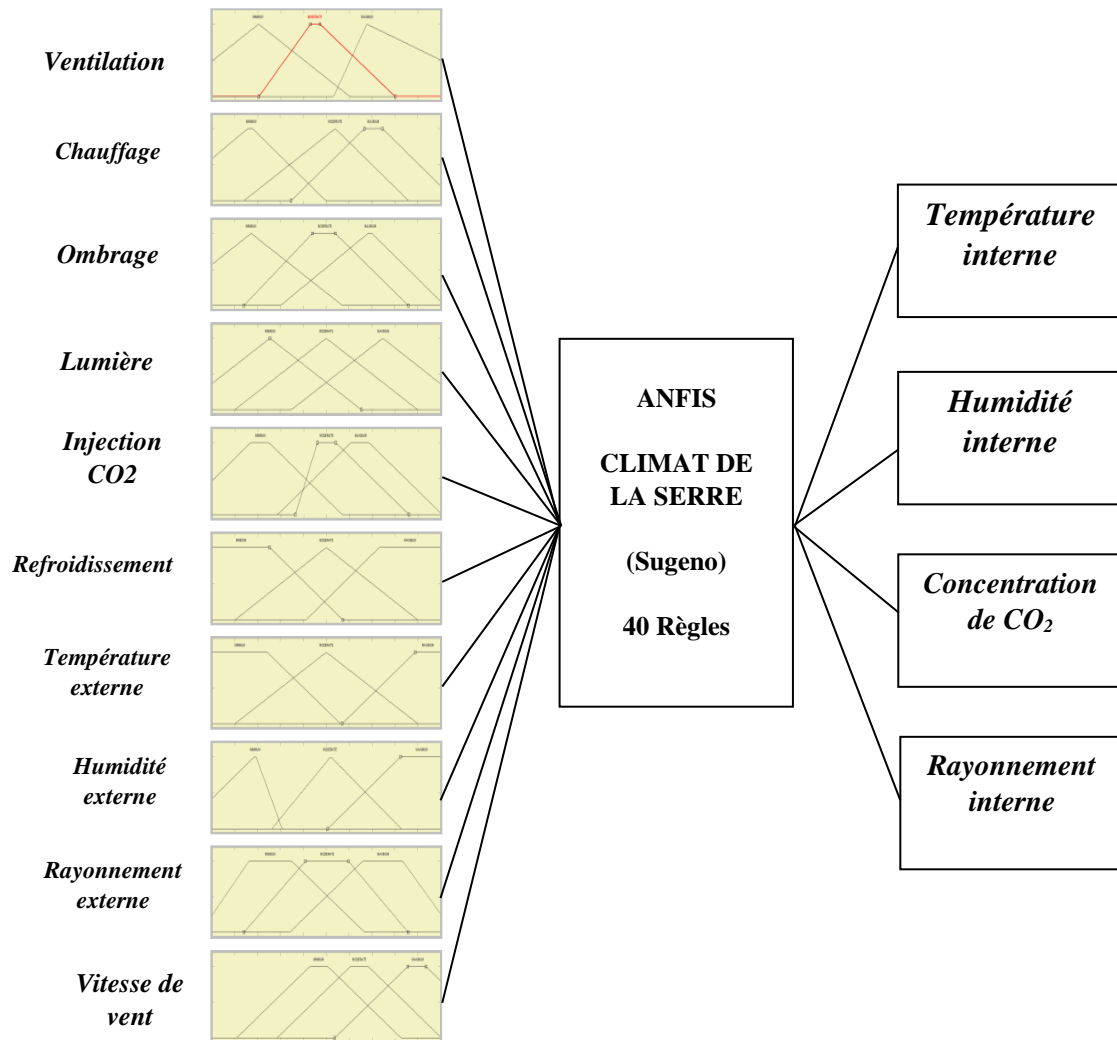


Fig. 3.8. Architecture de règles floues de la fonction d'appartenance trapézoïdale

Il montre l'architecture de règles floues de ANFIS lorsque la fonction d'appartenance trapézoïdale est adopté. L'architecture se compose de 40 règles floues. Au cours des essais préliminaires de l'architecture proposée avéré être suffisamment capable d'extraire modèle climatique à effet de serre des actionneurs de commande et les données météorologiques. Fig. 3.9, montre l'organigramme pour la prévision du climat interne par ANFIS.

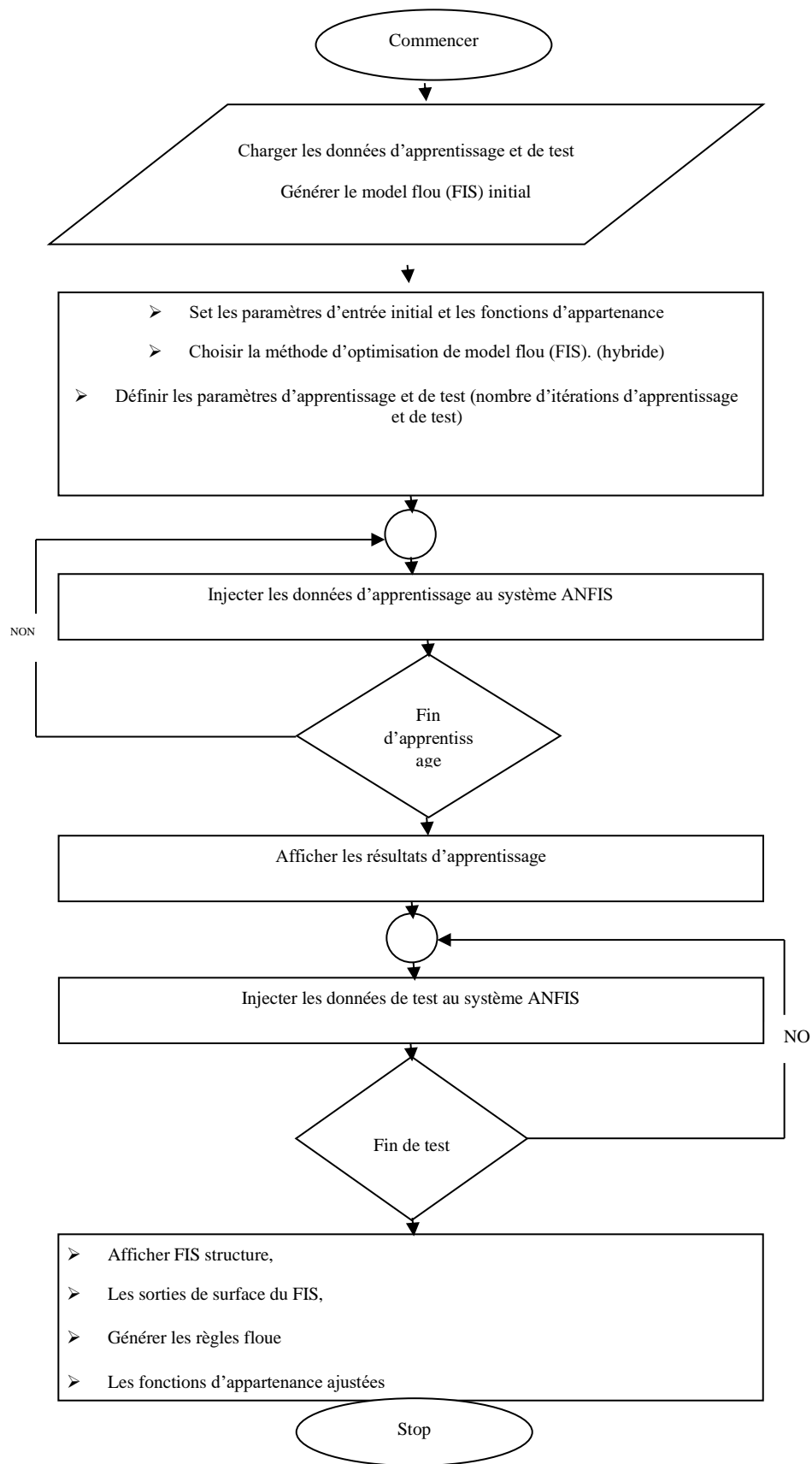


Fig. 3.9. Organigramme pour l'estimation de climat interne de la serre

3.6.2.3. ANFIS Modélisation, Apprentissage et Test

ANFIS processus de modélisation commence par l'obtention d'un ensemble de données (données d'entrées-sorties) et divisant en formation, essai et de contrôle des ensembles de données. Les données de formation constituent un ensemble de vecteurs d'entrée et de sortie. Les données sont normalisées de manière à la rendre appropriée pour le processus de formation. Ceci a été réalisé en faisant correspondre chaque terme à une valeur comprise entre 00, 01 et 10 en utilisant la méthode Min, Max et modérée. Ces données normalisée a été utilisé comme les entrées (actionneurs de contrôle des conditions et des données météorologiques) et des sorties (climat interne) pour former l'ANFIS. En d'autres termes, deux vecteurs sont formés dans le but de former le ANFIS (voir Fig. 3.8): Vecteur d'entrée = [ventilation, le chauffage, l'ombrage, la lumière artificielle, l'injection de CO₂, la formation de buée / refroidissement, la température extérieure, l'humidité extérieure, mondiale rayonnement et la vitesse du vent]. Le vecteur de sortie = [température interne, l'humidité interne, la concentration de CO₂ et le rayonnement interne]. Le ANFIS enregistre les données d'entrée que dans la forme numérique par conséquent les informations sur les organes de commande, le climat interne et externe de la serre doit être transformé en code numérique.

L'ensemble de données d'apprentissage est utilisé pour trouver les paramètres de postulat de départ pour les fonctions d'appartenance trapézoïdale en espaçant également chacune des fonctions d'appartenance. Une valeur seuil de l'erreur entre la sortie désirée et réelle est déterminée. Les paramètres qui en découlent sont trouvés en utilisant la méthode des moindres carrés.

Ensuite, une erreur pour chaque paire de données est trouvée. Si cette erreur est supérieure à la valeur de seuil, mettre à jour les paramètres de local selon la méthode convenable gradient en ce qui suit ($Q_{next} = Q_{nov} + \eta d$, où Q est un paramètre qui minimise l'erreur, η le taux d'apprentissage, et d est un vecteur de direction). Le processus est terminé lorsque l'erreur est inférieure à la valeur de seuil. Puis l'ensemble de données de contrôle est utilisé pour comparer le modèle avec le système actuel. Une valeur de seuil inférieure est utilisée si le modèle ne représente pas le système. (Fig. 3.10), représente la chute uniforme de la valeur d'erreur de test E_{TEST} avec le nombre

d'itérations au cours du processus de test pour la configuration avec ANFIS traingular Mf Mf et gaussien. La moindre erreur de test (ETEST) est atteint à l'itération 145 (traingular Mf) et à l'itération 107 pour gaussien Mf. On peut voir dans la (Fig. 3.10) que l'erreur converge pas vers zéro mais à 12% et 2%. Ceci est causé par la présence de quelques exemples de contredire dans la formation et les tests ensemble.

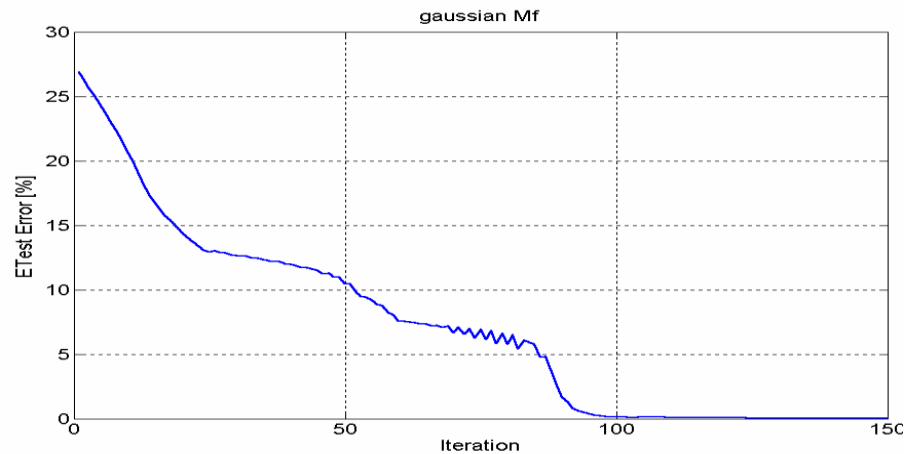


Fig. 3.10. Diminution de l'erreur pendant le processus de test pour la configuration ANFIS avec triangulaire Mf et gaussien Mf

L'apprentissage de l'ANFIS peut être arrêté par deux méthodes. Dans le premier procédé, ANFIS sera arrêté à savoir que lorsque l'erreur de test est inférieure à la limite de tolérance. Cette marge de tolérance serait définie au début de la formation. Il est évident que le rendement de l'ANFIS qui est formé avec une tolérance inférieure est supérieur à ANFIS qui est formé avec une plus grande marge de tolérance. Dans cette méthode, le temps d'apprentissage va changer avec l'architecture de l'ANFIS. La deuxième méthode pour arrêter l'apprentissage est de mettre contrainte sur le nombre d'itérations d'apprentissage. Dans notre étude, l'architecture ANFIS est arrêtée à apprendre après 500 itérations d'apprentissage.

3.7. LES RESULTATS

3.7.1. Les données de mesure

Les relevés ont été effectués entre le 20 février et le 7 avril sur le site de BENOMOR, une pépinière horticole de tomates située à GUELMA (Algérie). La serre utilisée pour toutes les mesures expérimentales est une structure en plastique à plusieurs chapelles, avec une double paroi gonflable, d'un volume de 2500 m³. Elle couvre une surface au sol de 1000 m² et est orientée

selon un axe est-ouest. Les parois latérales et le toit sont en polyéthylène. Cette serre, avec ses paramètres climatiques d'entrée et de sortie, est modélisée sous la forme d'un modèle hydrique, tel qu'illustré dans la (fig.3.11) :

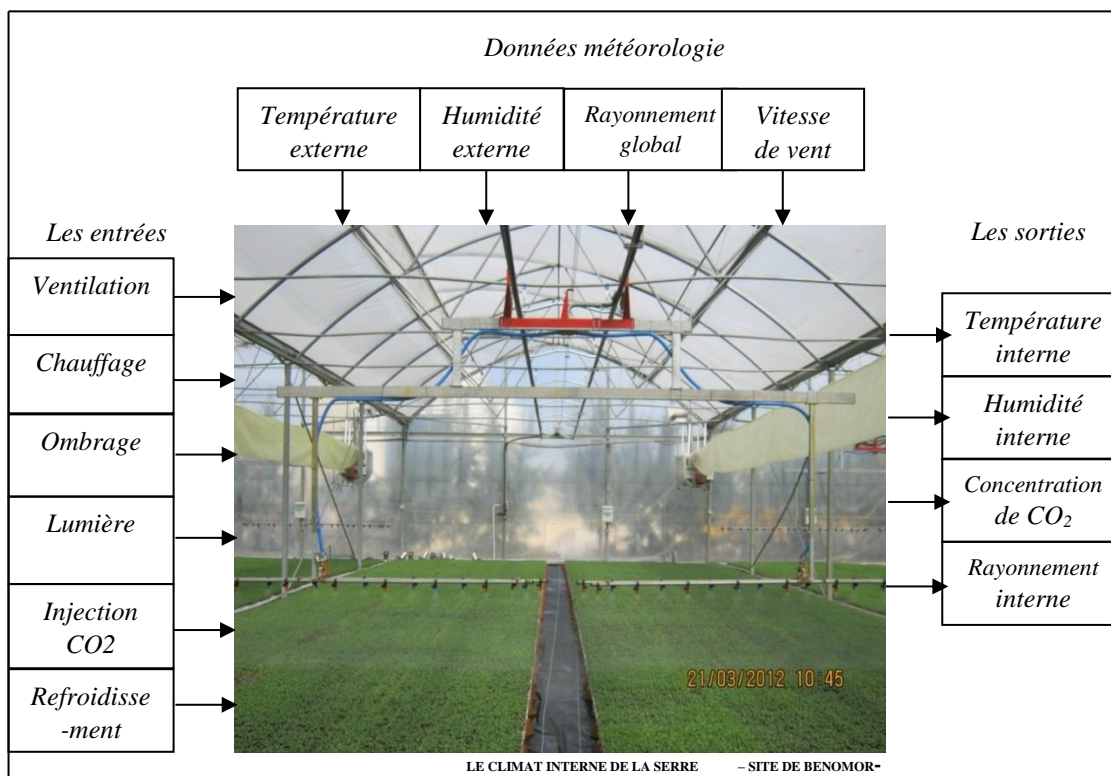


Fig. 3.11. Le climat interne de le serre

Afin de mener à bien notre étude, nous avons segmenté les enregistrements de données sur une période de 48 jours en trois ensembles distincts. Le premier ensemble contient les valeurs d'apprentissage pour les 16 premiers jours, le deuxième est réservé à la validation, et enfin le troisième est utilisé pour les tests. Ces divisions sont illustrées dans les figures (3.12).

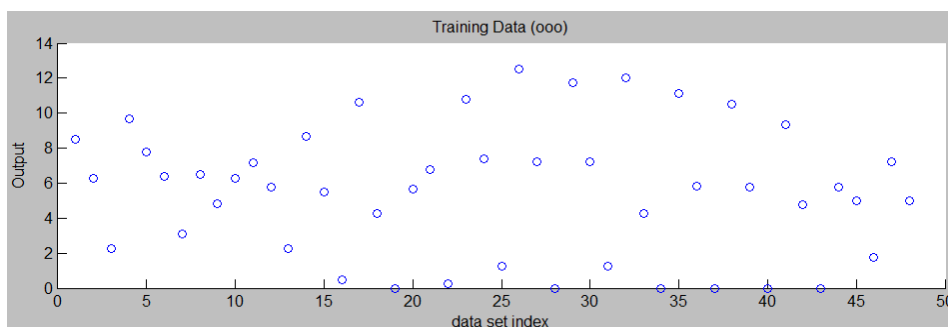


Fig. 3.12.a : Données mesurées de chauffage d'apprentissage

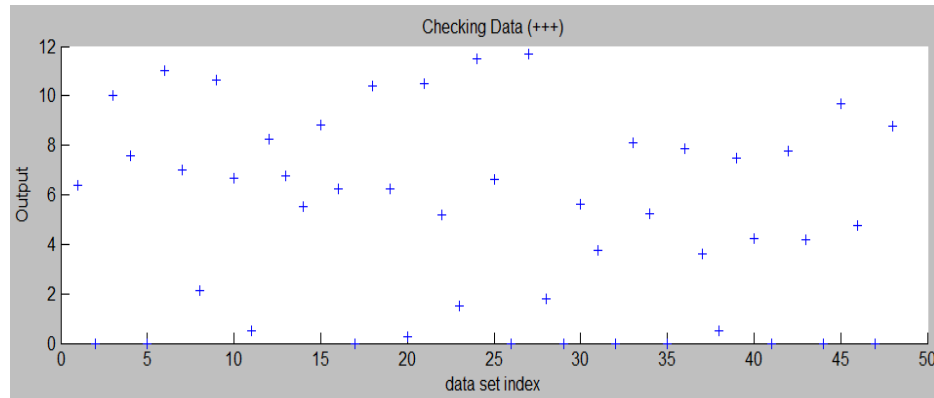


Fig. 3.12.b : Données mesurées de chauffage de validation

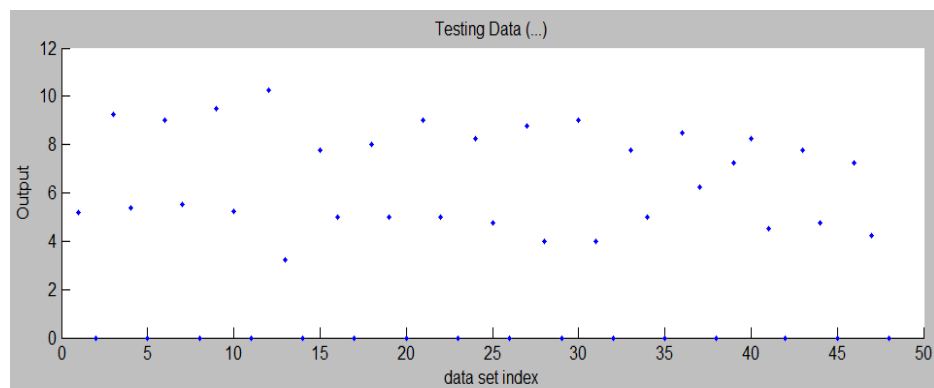


Fig. 3.12.c : Données mesurées de chauffage de teste

3.7.2. Évaluation du modèle en utilisant les données de validation et de test

La validation du modèle implique l'application des vecteurs d'entrée des données mesurées en entrée-sortie sur lesquels le modèle FIS n'a pas été formé. Cela est réalisé à l'aide d'un ensemble de données distinct appelé données de test et de validation. Cette approche vise à évaluer la capacité de généralisation du modèle FIS et à prévenir le surajustement aux données d'entraînement [5].

3.7.3. Discussion des résultats

Les figures (3.13, 3.14) illustrent une excellente correspondance entre les sorties des données mesurées et les sorties du modèle pour le chauffage et l'extracteur. Les données réelles sont représentées en bleu et les valeurs calculées en rouge.

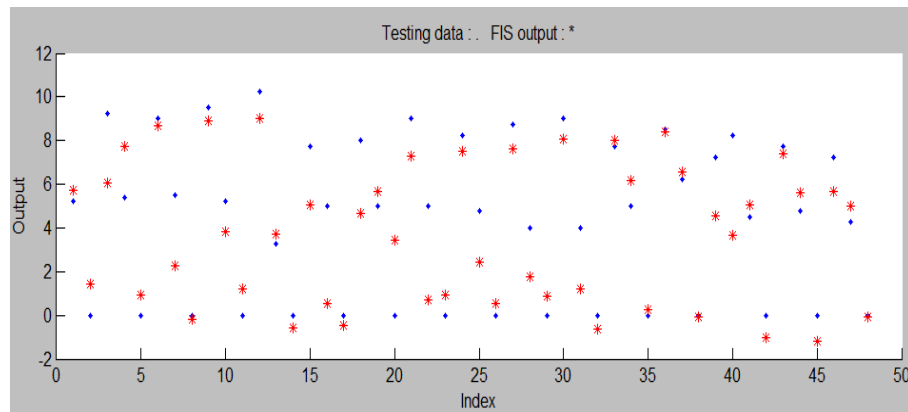


Fig. 3.13.a : comparaison entre les valeurs réelles et calculées de chauffage de teste (erreur = 1.2653)

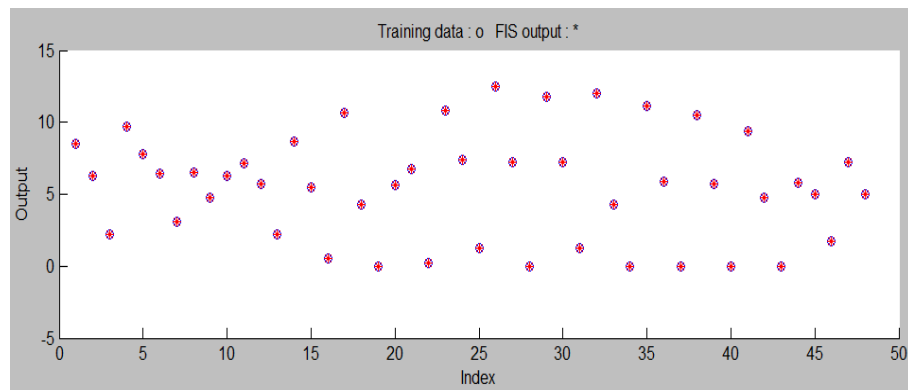


Fig. 3.13.b : comparaison entre les valeurs réelles et calculées de chauffage d'apprentissage (Erreur = 1.2561e-005)

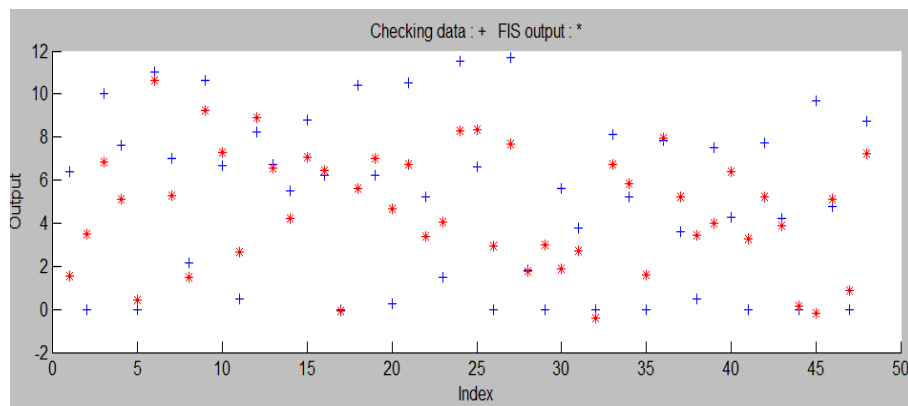


Fig. 3.13.c : comparaison entre les valeurs réelles et calculées de chauffage de validation

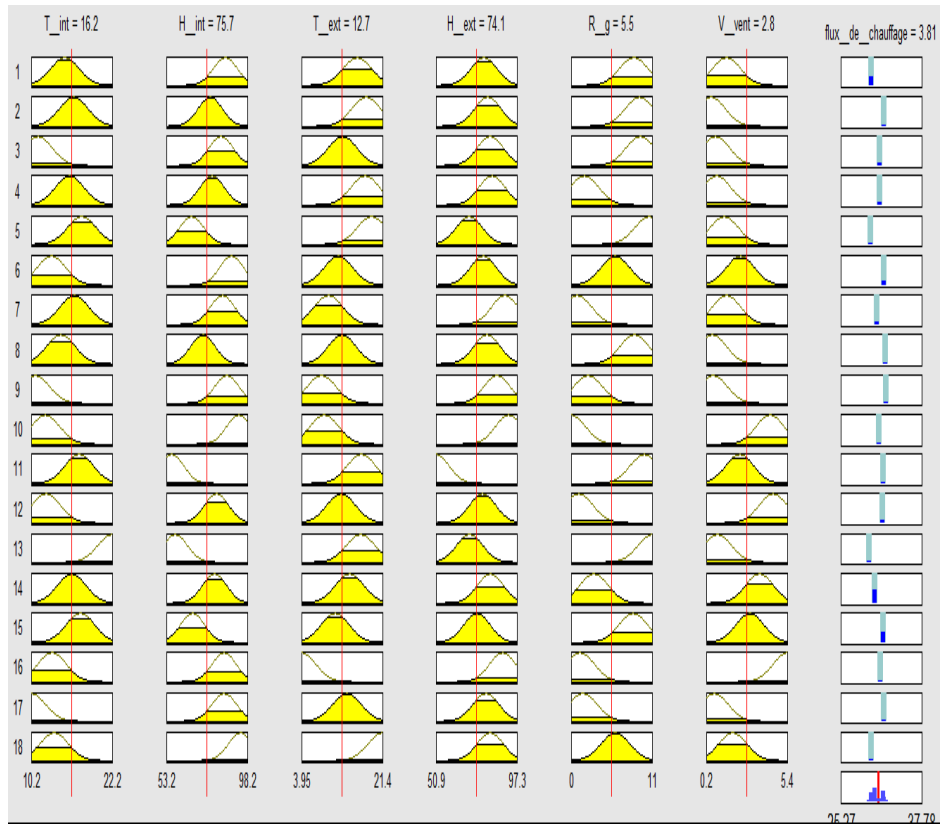


Fig. 3.13.d : Les règles floues de la commande de chauffage

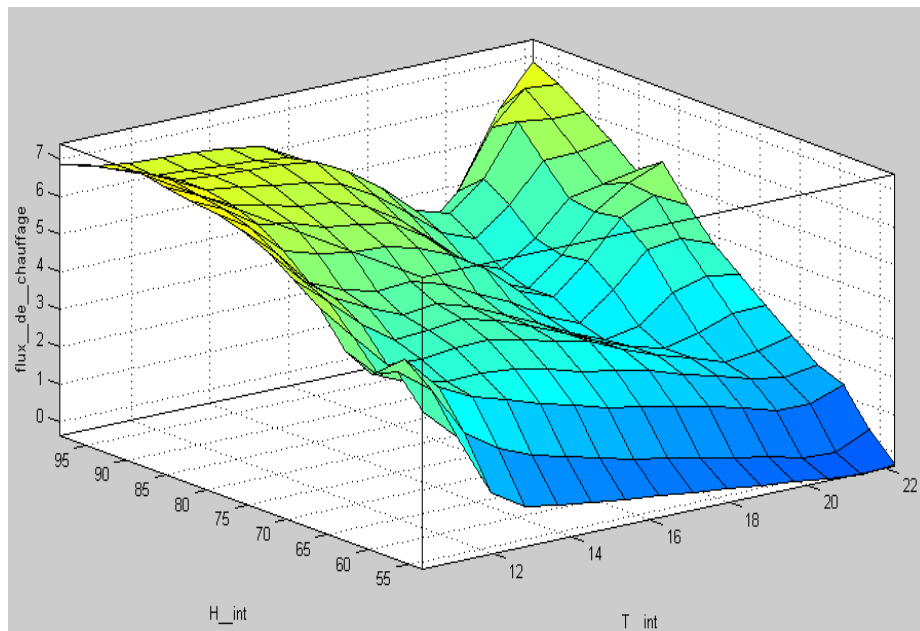


Fig. 3.13.e : La surface de la sortie réelle de chauffage

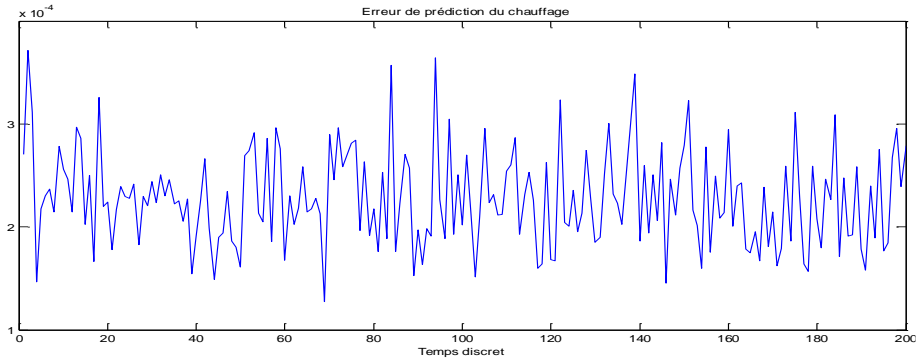


Fig. 3.13.f : l'erreur de prédiction du chauffage ($1.8235e-004$)

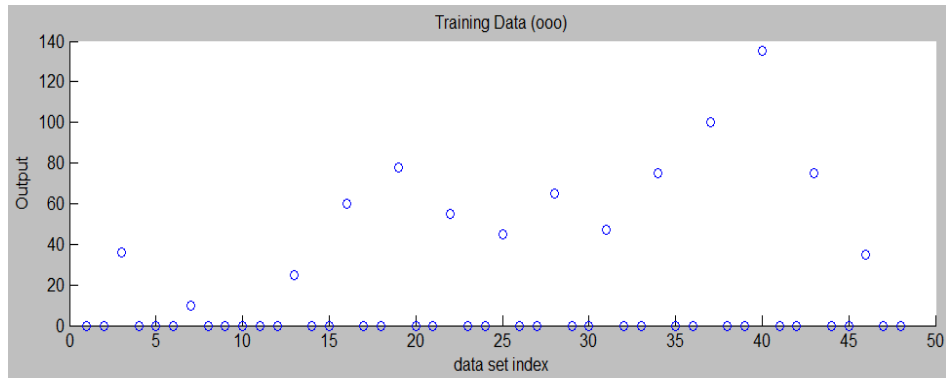


Fig. 3.14.a : Données mesurées de ventilation d'apprentissage

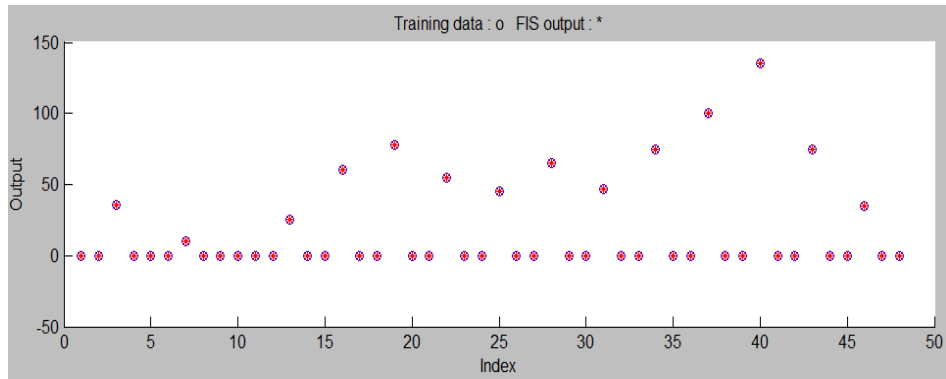


Fig. 3.14.b : comparaison entre les valeurs réelles et calculées de ventilation d'apprentissage (erreur = $5.7202 e-005$)

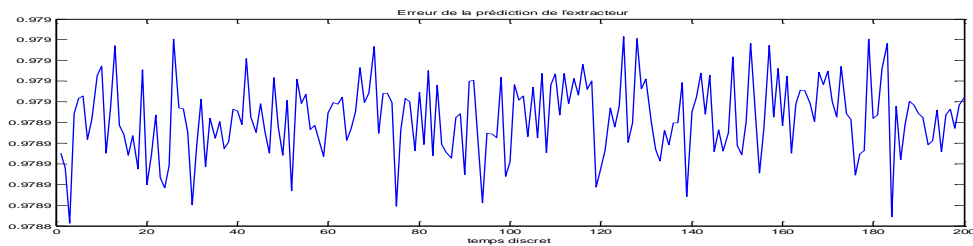


Fig. 3.14.c : l'erreur de prédiction de ventilation ($3.5471e004$)

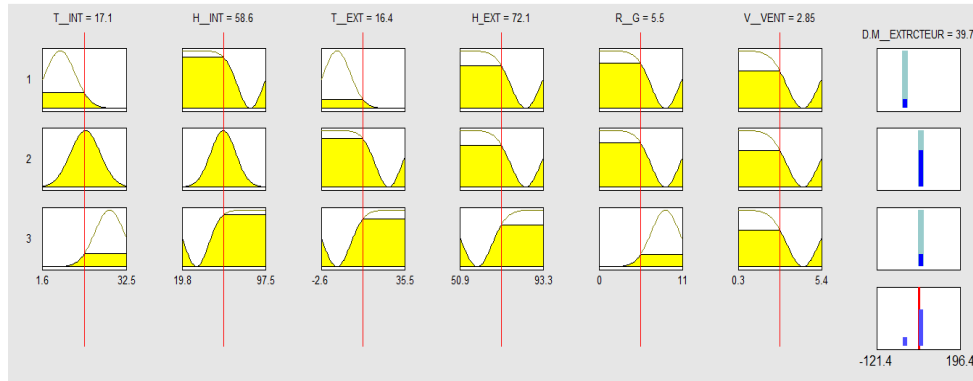


Fig. 3.14.d : Les règles floues de la commande de ventilation

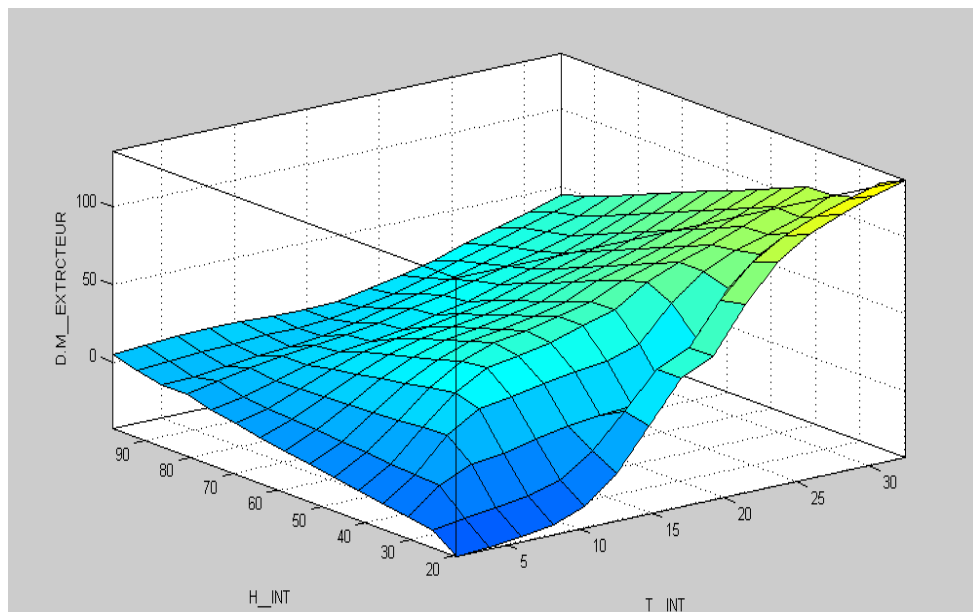


Fig. 3.14.e : La surface de la sortie réelle de chauffage

Les résultats des expériences et la comparaison et l'analyse des résultats entre le modèle expérimental et ANFIS en fonction des paramètres climatiques internes à effet de serre. Les résultats et / ou les valeurs de température intérieure, de l'humidité interne, de la concentration du CO₂ et le rayonnement interne sont représentés graphiquement au moyen de diagrammes en fonction du temps de la croissance des plants (Fig. 3.15). Les valeurs de prédiction coïncident bien avec les valeurs des expériences.

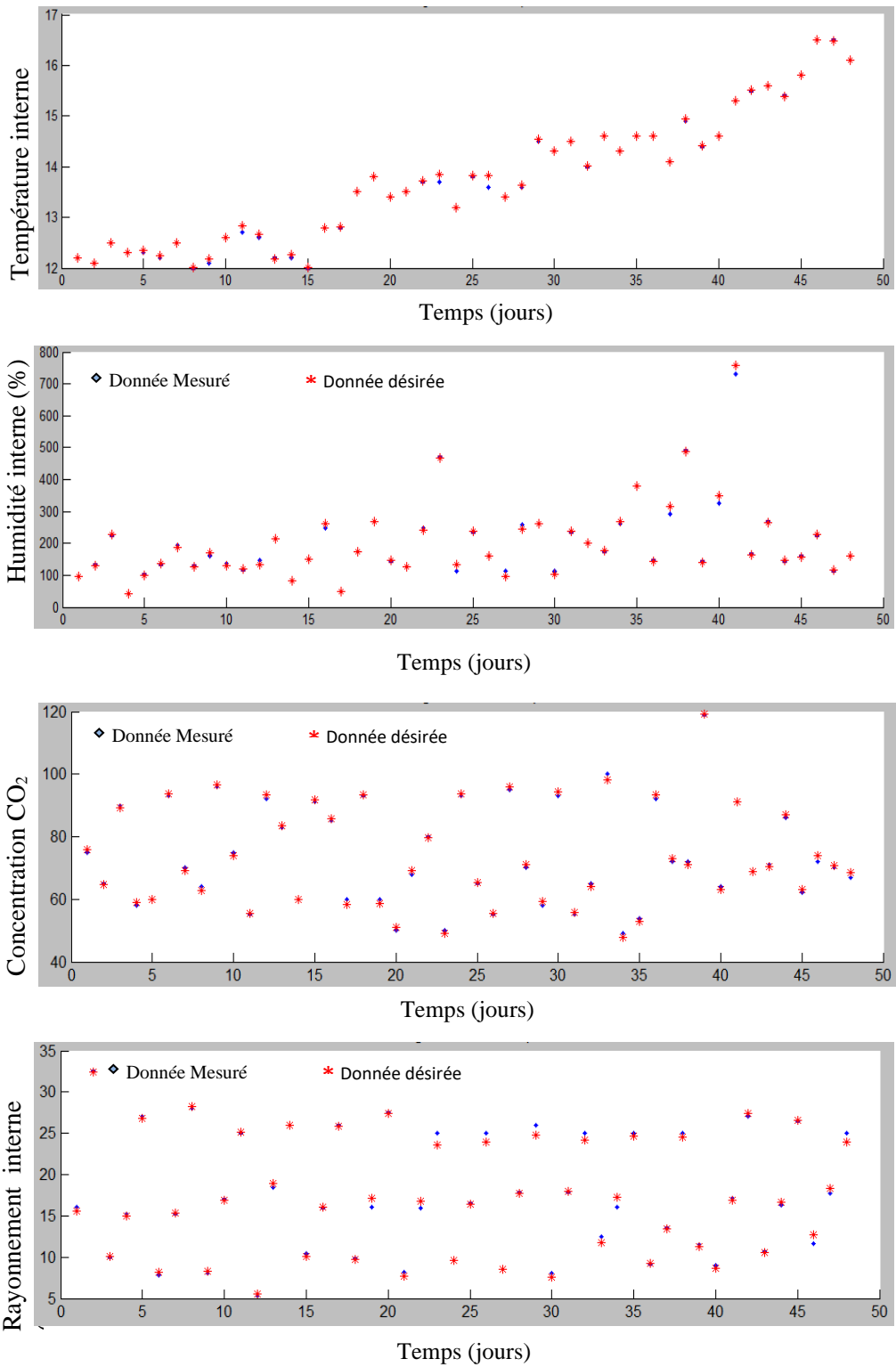


Fig. 3.15. Comparaison entre les données mesurées et désirées pour le climat interne de la serre

La capacité prédictive de l'utilisation des approches de réseaux neuronales et ANFIS sont comparées en utilisant des statistiques, qui ont montré que les prédictions ANFIS pour la température interne ($E_{\text{test Tint}} = 0,723$), l'humidité interne ($E_{\text{test Hint}} = 0,556$), la concentration de CO₂ ($E_{\text{test CO2}} = 0,521$) et la rayonnement interne ($E_{\text{test Rint}} = 0,385$) étaient pour 2% au plus près des mesures expérimentales, comparativement à 6% en utilisant uniquement la méthode de réseau neuronal.

CONCLUSION

L'ANFIS est utilisée pour estimer avec succès le climat de la serre au cours du processus de croissance des plants. On peut affirmer que la comparaison des résultats obtenus à partir du modèle ANFIS et des résultats expérimentaux confirme l'efficacité et la précision du modèle pour prédire le climat de la serre. En utilisant un rétro-propagation et la méthode d'apprentissage des moindres carrés, le système de ANFIS est formé avec une précision de 2% d'erreur pour les quatre composantes. L'erreur des valeurs climatiques internes prédites par ANFIS avec la combinaison de la fonction sigmoïde et gaussien adhésion est de seulement 2%, pour atteindre une précision aussi élevée que 98%. Lorsque la fonction d'appartenance triangulaire est adopté l'erreur moyenne est d'environ 12%, avec une précision de 92%.

CHAPITRE 4.

Implémentation d'un contrôleur neuro-flou sur une carte FPGA.

4. Les PLCs (Programmable Logic Controller):

4.1 Introduction

Les PLCs se positionnent comme une solution fiable dans le domaine de l'électronique digitale. En effet, la capacité à programmer un composant afin qu'il opère selon les exigences du concepteur représente un atout précieux pour concevoir efficacement des circuits complexes avec des délais serrés et des coûts maîtrisés. Contrairement aux circuits logiques préfabriqués par les fabricants, tels que les portes logiques de la famille 4000 ou les fonctions logiques des contrôleurs de bus, qui sont caractérisés par des entrées et sorties fixes, une architecture figée, un encombrement étendu (quelques portes logiques dans un boîtier volumineux) ainsi qu'une consommation énergétique élevée, ces composants sont peu adaptés aux petites applications simples et aux circuits à densité moyenne.

Les circuits logiques programmables, également connus sous le nom de PLD (Programmable Logic Device) en anglais, fournissent la possibilité de configurer la structure interne du composant pour exécuter une fonction voulue par l'utilisateur et de paramétrer les épines d'entrée/sortie. Cette distinction se fait par rapport aux microprocesseurs ou microcontrôleurs qui sont également programmables, mais dont le fonctionnement peut uniquement être programmé en fonction d'un programme préexistant dans une mémoire. Dans le cas des microprocesseurs et microcontrôleurs, l'architecture interne ainsi que les entrées/sorties sont définies par le fabricant (TAV, 1996).

Au cours du temps, les PLDs ont évolué sur le plan technologique, depuis l'introduction du premier PAL (Programmable Array Logic) jusqu'à l'accomplissement des FPGA (Field Programmable Gate Array). Les FPGA sont actuellement les circuits logiques programmables les plus performants, résultant d'une concurrence industrielle et scientifique (TAV, 1996). Dans la suite, nous examinerons les diverses catégories de familles de circuits logiques programmables.

4.2 Description des PLDs (Programmable Logic Device):

Un circuit programmable est une composition d'opérateurs combinatoires, généralement issus de mémoires (réseaux logiques) ou de fonctions standard (multiplexeurs et portes XOR), ainsi que de bascules. La fonction réalisée par ce circuit n'est pas définie lors de sa fabrication, et il offre potentiellement la capacité de réaliser une gamme variée de fonctions, qui peut varier en fonction de son architecture. La programmation du circuit implique le choix d'une fonction particulière parmi celles qui sont potentiellement réalisables. Tout comme dans la logique câblée conventionnelle, la définition d'une fonction logique découle des interconnexions entre les opérateurs combinatoires et les bascules, ainsi que des équations définissant les opérateurs combinatoires. Ainsi, la programmabilité d'un circuit repose sur les interconnexions et les opérateurs combinatoires qu'il renferme (JAC, 2000).

4.3 Architecture fondamentale d'un PLD :

La plupart des circuits PLDs adoptent la structure suivante (LAU, 1997) :

- Un bloc d'entrées permettant de fournir l'état de chaque entrée ainsi que son complément au bloc combinatoire.
- Une série d'opérateurs logiques "ET" reliés aux variables d'entrée ainsi qu'à leurs compléments.
- Une série d'opérateurs logiques "OU" pour interconnecter les résultats des opérateurs "ET".
- Un module de sorties.
- Un module d'entrées/sorties.
- Un bloc d'entrées/sorties équipé d'une porte à trois états et d'une broche d'entrée/sortie.

Le bloc combinatoire programmable est formé de matrices "ET" et de matrices "OU", également appelées sommes de produits (toute fonction logique combinatoire peut être exprimée sous forme de somme de produits) (STE, 2005). Les liaisons entre ces matrices nécessitent d'être configurables, ce qui est accompli en utilisant des fusibles qui sont consommés durant la programmation.

En revanche, l'approche alternative, connue sous le nom de "cellule universelle interconnectée", implique de renoncer à la normalisation en première forme des équations logiques. Dans cette méthode, le circuit est fragmenté en blocs logiques autonomes, connectés par des trajets de routage. Une fonction logique est décomposée de manière récursive en opérations simples jusqu'à ce que les opérations élémentaires s'intègrent dans une cellule (*JAC, 2000*).

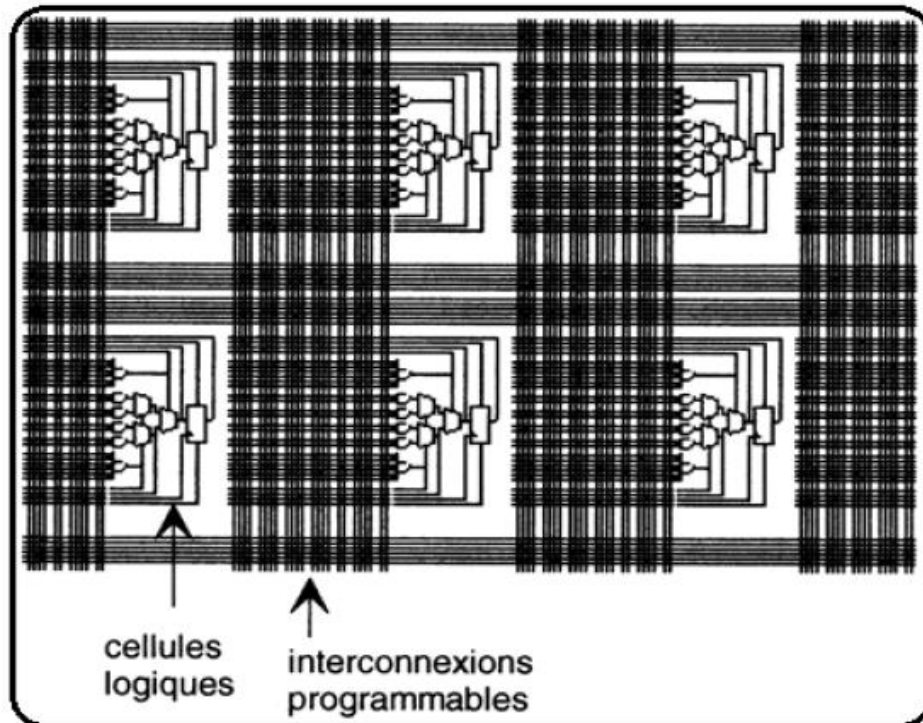


Fig. 4.1 : cellules logiques interconnectées.

Le bloc de sortie est communément désigné sous le nom de macrocellule de logique de sortie (OLMC1 : Output Logic Macro Cell). La macrocellule a joué un rôle essentiel dans l'évolution des circuits logiques programmables. Effectivement, elle génère au composant une configuration contrôlée : entrée/sortie ou mode haute impédance. La performance du composant influence le niveau d'options offertes par sa macrocellule (*TAV, 1996*). Cette dernière englobe les éléments suivants :

- Une porte "OU" exclusif et une bascule D.

- Comprenant des multiplexeurs pour définir diverses configurations et un mécanisme de rétroaction vers la matrice "ET".

- Englobant des fusibles de configuration (pour les FPGAs, des cellules de contrôle de ponts de connexion sont employées).

Placement et routage : cette étape consiste à associer les blocs de calcul aux opérateurs logiques d'une fonction tout en sélectionnant les broches d'entrée/sortie. Le routage englobe la création des interconnexions nécessaires. Dans le cas de PLDs simples, le placement est généralement aisé et le routage est peu complexe. Les compilateurs génériques (indépendants du fabricant) accomplissent ces deux étapes de manière efficace. Cependant, pour les CPLDs et plus particulièrement les FPGAs, ces étapes deviennent plus élaborées et exigent des outils spécifiques fournis par le fabricant (*JAC, 2000*).

4.4 Les Catégories de PLDs

La classification des PLDs peut s'avérer complexe et ardue, car les distinctions de technologie sont accompagnées de variations d'architecture. La classification qui suit vise simplement à mettre en évidence les principaux repères. Cependant, on peut les regrouper en fonction de leurs structures internes, notamment le nombre d'entrées, de sorties, de connexions programmables et le degré d'intégration (*TAV, 1996*).

Type	Nombre de porte intégré	Matrice ET	Matrice OU	Effaçable
PAL	10 à 100	Programmable	Fixe	Non
GAL	10 à 100	Programmable	Fixe	Électriquement
EPLD	100 à 3000	Programmable	Fixe	Par UV
FPLA	2000 à 3000	Programmable	Programmable	Électriquement
FPGA	Plus de 50 000	Programmable	Programmable	

4.4.1 Les Programmable Array Logique (PALs)

Dès leur arrivée sur le marché en tant que pionniers des circuits logiques programmables, les PAL ont rencontré un succès considérable. Les PAL sont des éléments simples, issus des mémoires PROM (mémoires mortes programmables en lecture unique), et

ils ont été conçus par les ingénieurs de MMI. Ils ont fusionné la technologie des fusibles employée dans les PROM avec des portes logiques ET et OU afin de mettre en œuvre des fonctions logiques. La compréhension de la cellule de base d'un PAL est suffisante car elle se répète sur toute la capacité du composant (voir Figure 4.2). Cette cellule de base comprend un tampon d'entrée contenant l'information et son complément (tous les PAL, sans exception, disposent d'un certain nombre d'entrées qui sont toutes connectées, en forme directe et inversée, à la matrice de fusibles programmables). Ensuite, il y a la matrice de fusibles, suivie des portes ET (utilisées en entrée), puis des portes OU en sortie (TAV, 1996).

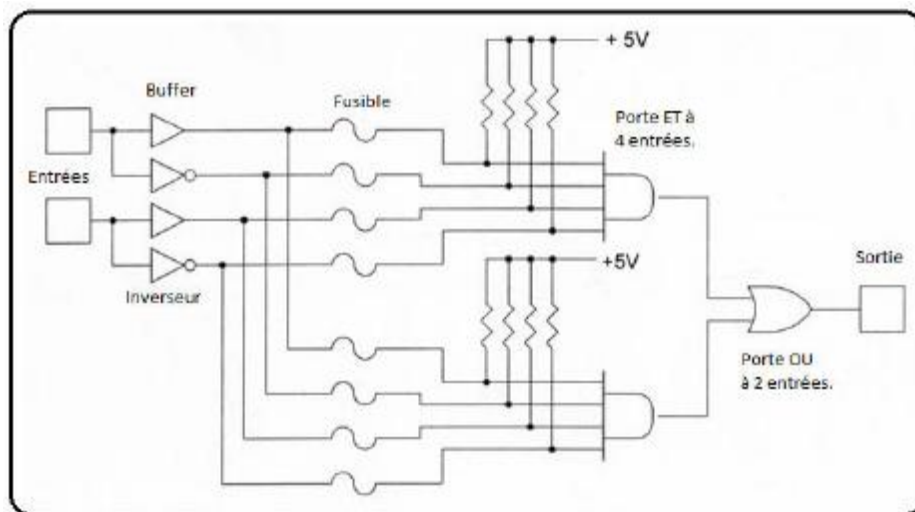


Fig. 4.2. Unité fondamentale d'un PAL (structure combinatoire).

La programmation d'un PAL se réalise en détruisant des fusibles à l'aide d'un programmeur spécifique, en appliquant les tensions de programmation nécessaires. Le principal inconvénient des PAL réside dans le fait qu'une fois programmés, ils ne peuvent plus être effacés (les fusibles sont détruits), ce qui peut poser problème en cas d'erreur de programmation ou de nécessité de mise à jour.

Les PAL existent dans quatre architectures (dans l'ordre de leur évolution) (LAU, 1997):

1. Les PALs combinatoires : Présentant l'architecture la plus élémentaire, les PALs de ce type dédient certaines broches exclusivement aux entrées, tandis que d'autres, bidirectionnelles, sont associées à un buffer de sortie à trois états.

2. Les PALs à registres : Dotés d'une bascule de type D en sortie, ces PAL force tout signal de sortie à passer par cette bascule. Pour cette raison, certains boîtiers offrent un nombre défini de sorties à registre (synchrone), tandis que d'autres restent de type combinatoire.

3. Les PALs asynchrones à registres : Cette variante des PALs à registres diffère par la méthode de distribution de l'horloge des bascules. Contrairement aux PALs à registres, un multiplexeur est utilisé pour court-circuiter le registre. Les deux entrées AP (Préposition Asynchrone) et AR (Réinitialisation Asynchrone) sont simultanément employées pour contrôler ce multiplexeur. Notons la présence d'un XOR agissant comme un inverseur programmable. Le signal de commande de ce XOR est statique, ne provenant ni d'un signal global ni de la matrice. C'est à partir de là que le concept de "macro cellule" programmable a été introduit. Cette capacité d'inversion permet de coder une fonction indépendamment de la polarité du signal de sortie.

4. Les PALs versatiles (VPAL) : Constituant une évolution majeure des PALs, les VPALs proposent des macro cellules hautement développées, similaires à celles que l'on trouve au sein de composants plus complexes (CPLD, FPGA). Le mode de fonctionnement est obtenu grâce à l'utilisation de deux multiplexeurs qui utilisent les points de programmation S0 et S1 comme signaux de sélection. Différentes configurations de sortie sont obtenues en combinant ces deux points de programmation.

4.4.2. Les Generique Array Logic (GALs)

Les GALs sont essentiellement des PALs reprogrammables sur le plan architectural. Cependant, d'un point de vue technologique, ils ont opté pour l'utilisation de transistors MOS FET régénérables au lieu de transistors bipolaires. Cette capacité de régénération des fusibles s'accompagne d'une durée de vie du composant préservée.

Après avoir analysé les besoins du marché, LATTICE SEMICONDUCTOR a défini quatre objectifs clés pour le développement des GALs :

1. Fournir des produits ayant des performances comparables à celles des PALs bipolaires, tout en étant soumis à un test à 100%.
2. Permettre un remplacement, au moins fonctionnel, et idéalement broche pour broche, des PALs bipolaires dans toutes les applications.

3. Réduire considérablement la consommation d'énergie par rapport aux PALs bipolaires de complexité équivalente.
4. Proposer une plus grande flexibilité dans la configuration des entrées/sorties que les PALs bipolaires. C'est ainsi que LATTICE a surmonté les principaux inconvénients des PALs pour créer un composant qui rivalise fortement avec eux (TAV, 1996).

4.4.3 Les Erasable Programmable Logic Devices (EPLDs)

Les EPLDs sont des dispositifs électroniques conçus en utilisant la technologie CMOS, ce qui présente l'avantage d'une consommation d'énergie réduite, bien que cette consommation augmente avec la fréquence. Ils intègrent une macrocellule plus avancée que celle des PALs et ont l'avantage d'être réinscriptibles (TAV, 1996).

L'introduction des EPLDs par ALTERA avait deux objectifs distincts :

1. Proposer une densité d'intégration nettement supérieure à celle offerte par les PALs, s'approchant autant que possible de celle permise par les réseaux de portes programmables.
2. Atteindre des vitesses de fonctionnement, sinon équivalentes, du moins comparables à celles des PALs bipolaires, et en tout cas nettement supérieures à celles des portes traditionnelles.

Les diverses catégories d'EPLDs sont les suivantes :

- 1. Les EPLDs classiques de la série EP.** Ces composants sont disponibles dans plusieurs versions avec des boîtiers comprenant de 20 à 68 broches. Ils peuvent être effacés par exposition aux rayons UV.
- 2. Les EPLDs de la série MAX 5000,** qui remplissent la même fonction que leurs homologues de la série EP, mais avec une densité d'intégration plus élevée et une architecture d'interconnexion différente. Ils peuvent être effacés par exposition aux rayons UV.
- 3. La série MAX 7000,** qui est plus dense que la série MAX 5000 et peut être effacée électriquement.
- 4. La série MAX 9000,** qui est encore plus dense, peut être effacée électriquement et peut également être programmée sur le circuit avec une tension unique de 5 V.

4.4.4. Les Complex Programmable Logic Devices (CPLDs)

L'agencement typique d'un CPLD se manifeste sous la forme d'un ensemble de fonctions de type PAL qui peuvent être connectées entre elles à travers une matrice. La

structure se caractérise généralement par une grande organisation. Un regroupement de macros cellules de base est formé pour créer des blocs logiques. La complexité, le nombre de macros cellules dans chaque bloc, ainsi que le nombre de blocs varient d'un composant à l'autre. On peut identifier deux niveaux d'interconnexion : une matrice globale et un système de distribution des signaux intégré à chaque bloc logique (LAU, 1997).

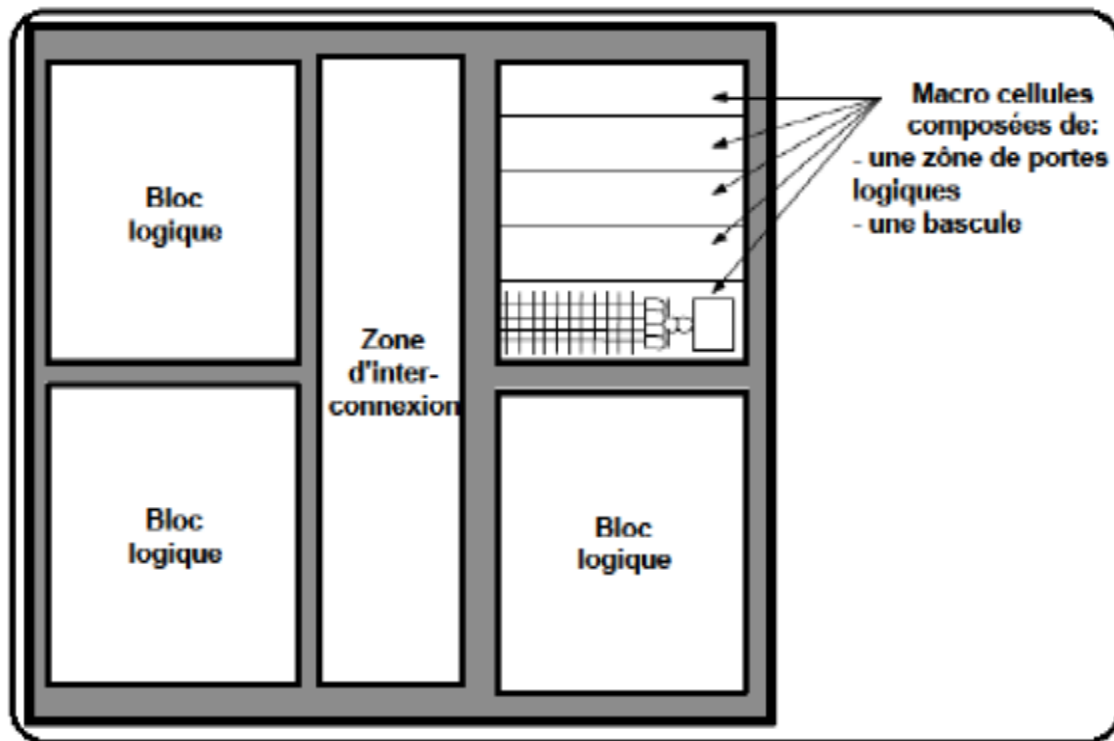


Fig. 4.3. Architecture global d'un CPLD.

4.4.5 Les FPGA Field Programmable Gate Array ou réseau logique programmable sur site :

Un FPGA représente un circuit logique reprogrammable. Grâce à des blocs logiques préconçus et des ressources de routage programmables, il s'agit d'un circuit configurable permettant la mise en place de fonctionnalités matérielles personnalisées, sans nécessité de recourir à une maquette ou à des opérations de soudure. La procédure consiste à élaborer des opérations de traitement numérique par le biais de logiciels, puis à les compiler en un fichier de configuration ou un flux de bits (bitstream) contenant des directives sur l'interconnexion

des composants. De plus, les FPGAs sont totalement reconfigurables et peuvent instantanément adopter une nouvelle configuration du circuit lorsqu'elle est recompilée.

4.5 Exploration des FPGAs:

4.5.1 Introduction et notions générales sur les FPGA :

Un FPGA est un élément électronique constitué de milliers, voire de millions de transistors interconnectés pour réaliser des opérations logiques. Il est capable d'effectuer des tâches simples telles que des additions ou des soustractions, ainsi que des opérations complexes comme le filtrage numérique des signaux ou la détection et la correction d'erreurs. Les domaines d'application des FPGAs sont vastes, englobant l'aérospatial, l'aviation, l'automobile, les radars, les missiles, les ordinateurs, entre autres.

L'évolution des circuits logiques programmables a suivi une progression, débutant par les PALs qui permettaient de réduire l'encombrement et de créer des fonctions logiques personnalisées. Ensuite, les EPLDs ont introduit l'écriture électrique via un programmeur, tout en étant effaçables grâce à la lumière ultraviolette (UV). Cette évolution a conduit aux CPLDs, qui sont effaçables électriquement. Les FPGAs, quant à eux, sont capables d'être reprogrammés in situ, offrant une flexibilité majeure.

L'un des avantages majeurs des FPGAs réside dans leur adaptabilité élevée. En effet, la structure interne d'un FPGA peut être modifiée sans altérer l'agencement global du dispositif. Cette caractéristique est particulièrement appréciée des concepteurs de cartes électroniques, car elle facilite la réalisation de prototypes rapides et économiques en comparaison avec les ASICs. Ces derniers nécessitent des mois de développement pour créer un prototype sans garantie d'opérationnalité, et la moindre erreur entraîne souvent un recommencement complet du travail.

La réduction des coûts et des délais de développement est cruciale dans les environnements industriels. Les FPGAs offrent également l'avantage de pouvoir mettre à jour le circuit pour corriger des problèmes ou ajouter de nouvelles fonctionnalités.

Xilinx, Altera (aujourd'hui Intel FPGA) et Quicklogic sont des pionniers dans le domaine des FPGAs, rejoints par de nombreuses autres entreprises productrices de FPGAs. Toutes suivent le même concept architectural, se divisant en trois parties principales : les

interfaces d'entrées/sorties (I/O interface), les blocs logiques de base (Basic Logic Building Blocks) et les interconnexions.

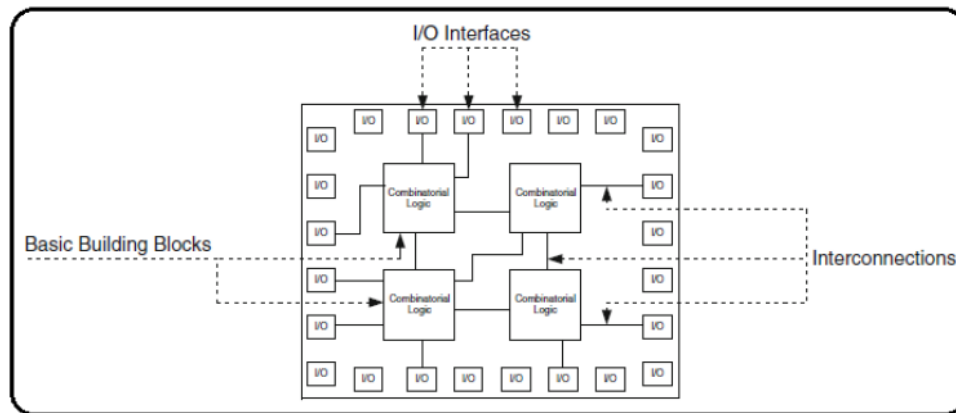


Fig. 4.4. Fondement conceptuel architectural des FPGAS [GIN10][TAV96].

4.5.1.1 Interconnexions d'entrées/Sorties (I/O interfaces) :

Les interfaces d'entrée/sortie agissent comme des intermédiaires par lesquels les données circulent entre les blocs logiques internes et les ressources externes, dans les deux sens. L'interconnexion des signaux peut prendre différentes formes : unidirectionnelle, bidirectionnelle, à deux états ou à trois états (0, 1 ou haute impédance), voire se conformer à des normes spécifiques d'entrée/sortie. Voici quelques exemples de ces normes :

- GTL (gunning transceiver logic)
- HSTL (high-speed transceiver logic)
- LVCMOS (low-voltage CMOS)
- LVTTTL (low-voltage transistor-transistor logic)
- PCI (peripheral component interconnect)...

L'objectif principal des interfaces d'entrée/sortie est de transmettre et de recevoir des données. Toutefois, elles peuvent également inclure des fonctionnalités optionnelles telles que des registres, des impédances et des tampons. Chaque fabricant attribue sa propre dénomination à ces interfaces d'entrée/sortie, mais leur fonction demeure constante. Par exemple, chez Altera, elles sont désignées sous le nom d'IOE (Input Output Element). Les IOE remplissent toujours leur rôle d'interfaces d'entrée/sortie et sont équipées d'une résistance de rappel pull-up ainsi que d'un temporisateur de signal.

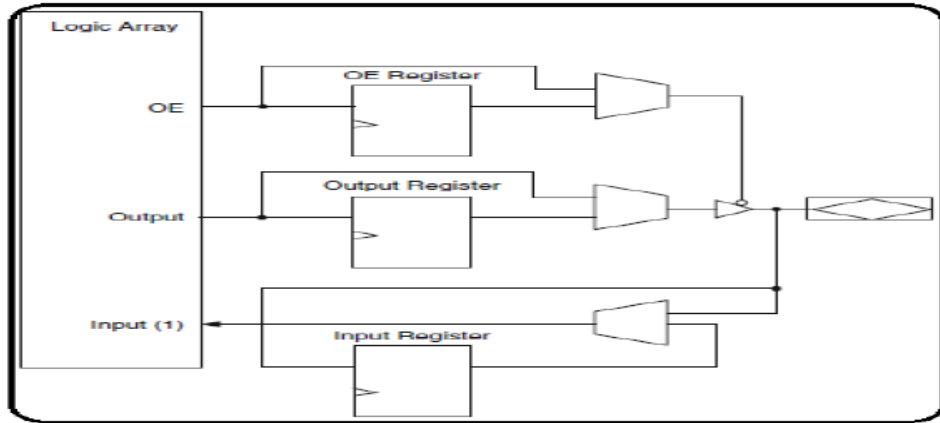


Fig. 4.5. Configuration interne d'IOE de la série Cyclone II [ALT11].

Chez Xilinx, les blocs d'entrée/sortie sont désignés par l'acronyme IOB, qui signifie Input Output Blocks. Les IOB comprennent des registres, des diviseurs de tension, des résistances de rappel pull-up et d'autres ressources spécifiques. Un exemple simplifié d'IOB de Xilinx est illustré dans la Figure 4.6.

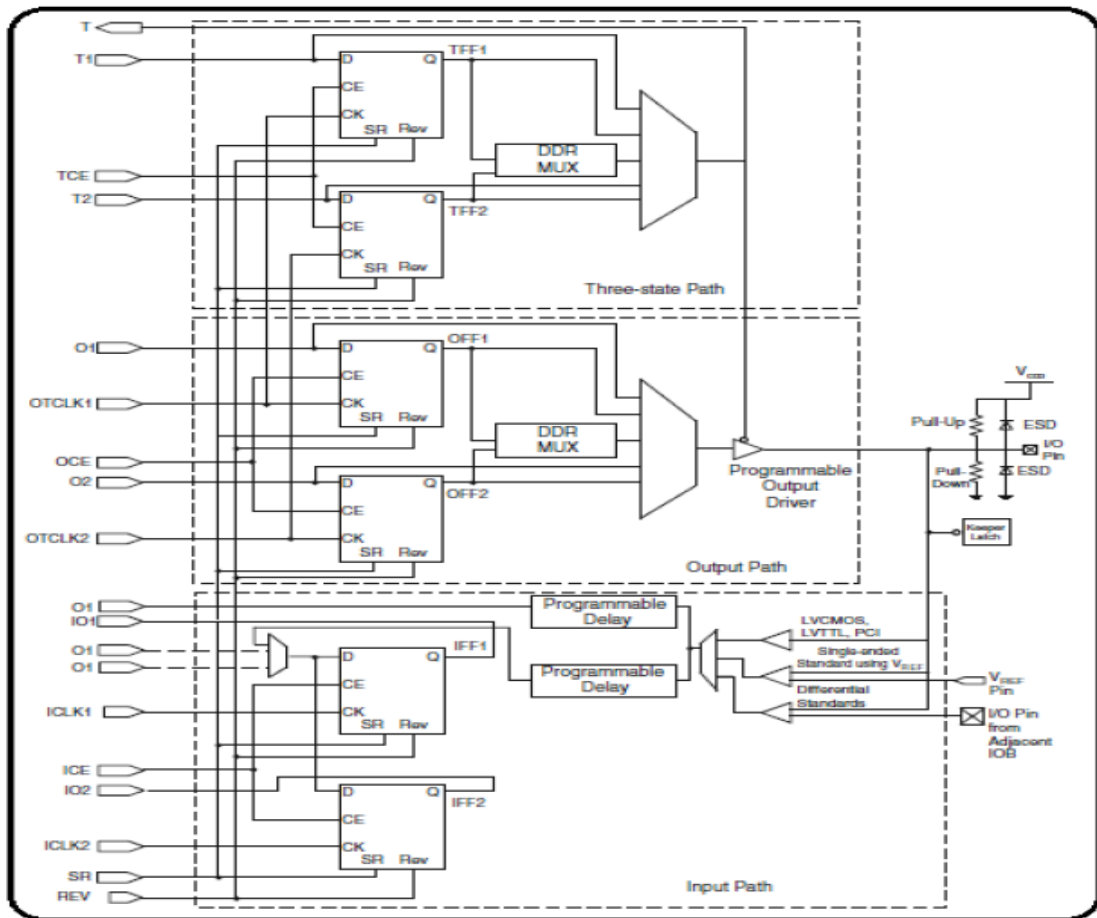


Fig. 4.6 : structure simplifiée d'un IOB [XIL11].

4.5.1.2 Les BLBB (Basic Logic Building Blocks) :

Les unités logiques fondamentales, également appelées blocs logiques de base, sont des ensembles de logique configurés ou optimisés pour réaliser des fonctions logiques spécifiques. Chez Altera, ces blocs logiques de base sont désignés sous le nom de module de logique adaptative, ou ALM (Adaptive Logic Module). L'ALM est composé d'éléments de logique combinatoire, de registres et d'additionneurs. L'élément de logique combinatoire contient 8 entrées et une table de recherche (Look Up Table ou LUT) (GIN, 2010). Consultez la figure 4.7 pour plus d'illustrations.

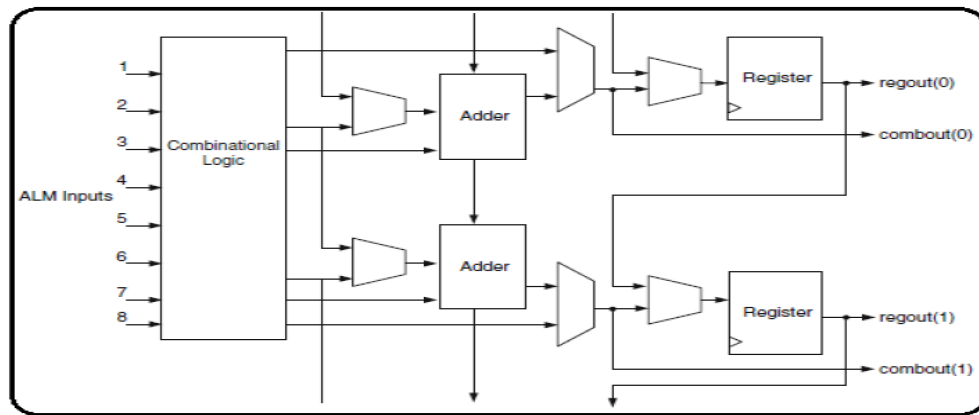


Fig. 4.7. Composition interne d'un ALM Adaptive Logic Module [ALT11].

Xilinx désigne les blocs logiques de base comme des blocs logiques configurables, ou CLB (Configurable Logic Blocks). Chaque CLB comprend des tranches (slices), et chaque tranche contient des tables de recherche (Lookup Tables ou LUTs). Pour plus de détails, veuillez vous référer à la figure 4.8.

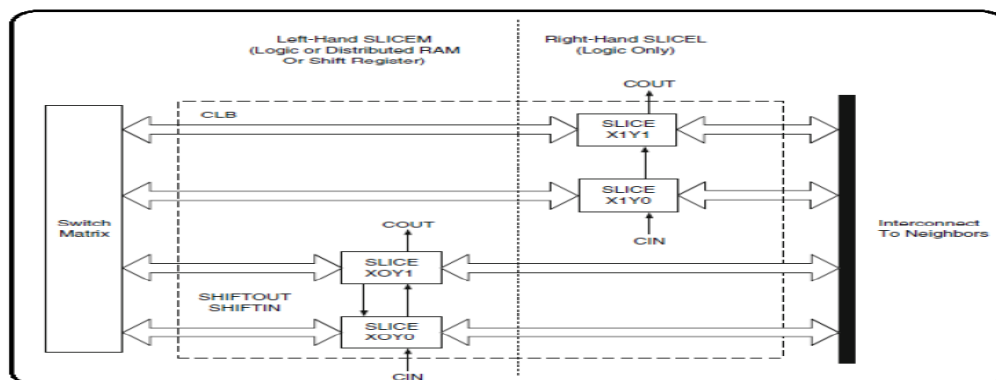


Fig. 4.8. Configuration d'un bloc logique configurable (CLB) et agencement des tranches (série Virtex) [XIL11].

Chaque fabricant établit sa propre structure de blocs logiques de base ainsi que le nombre de blocs disponibles. Cette variation découle du fait que les FPGAs sont employés dans une gamme diverse d'applications, et il n'existe pas un seul type de composant FPGA adapté à toutes les situations. Les FPGAs utilisés dans le secteur aéronautique, par exemple, diffèrent de ceux destinés à l'automobile ou à la téléphonie mobile, tant en termes de fonctions que de conditions de fonctionnement (GIN, 2010).

Le choix approprié d'un FPGA est simplifié grâce à la classification adoptée par les fabricants. Xilinx a adopté une approche basée sur des familles, tandis qu'Altera a opté pour des séries. Chaque catégorie ou gamme comprend des membres ou des sous-catégories. Les membres d'une même famille partagent des caractéristiques fondamentales, tandis que chaque membre se distingue des autres par ses propres spécificités, notamment en termes de mémoire, de ressources disponibles et de nombre d'entrées/sorties.

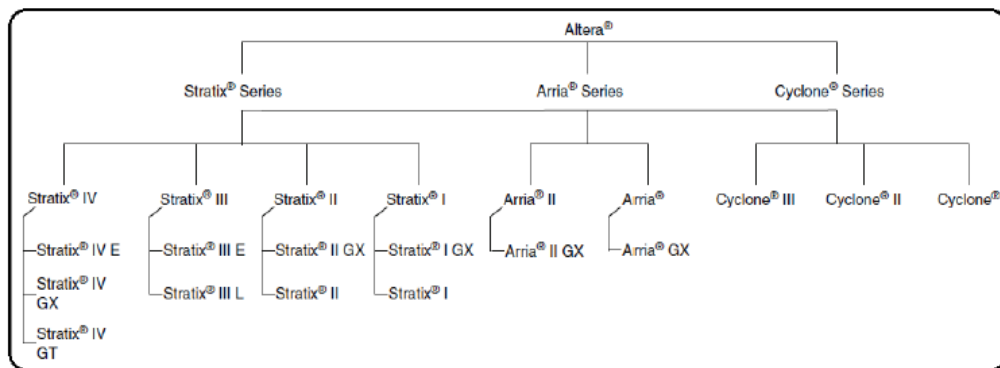


Fig. 4.9. Hiérarchie des séries Altera, comprenant Stratix haut de gamme et haute densité, Arria moyenne gamme, ainsi que Cyclone à faible coût et consommation électrique réduite.

Xilinx propose une variété de familles de FPGAs, Parmi celles-ci, on peut mentionner Virtex, Virtex-E, Virtex-Pro, Virtex 5 et Virtex 6 aussi SpartanW-3A, Spartan-3E et Spartan 6. Par exemple, la famille Spartan-3E se compose de cinq membres distincts (consultez le tableau ci-dessous). Le chiffre qui suit la lettre "S" dans la référence indique une échelle de 1 pour 1000 portes. Cette caractéristique est pratique car elle permet de déduire facilement le nombre de portes que le composant intègre en observant simplement sa référence (GIN, 2010).

Device	System Gates	Total CLBs	Total Slices	Max User I/O	Max Differential I/O Pairs
XC3S100E	100K	240	960	108	40
XC3S250E	250K	612	2,448	172	68
XC3S500E	500K	1164	4,656	232	92
XC3S1200E	1200K	2168	8,672	304	124
XC3S1600E	1600K	3688	14,752	376	156

4.5.1.3 Les Interconnexions :

Les interconnexions jouent un rôle essentiel en assurant la transmission des signaux d'un point à un autre. Différents types de lignes interconnectées sont présents (*TAV, 1996*) :

1. Les interconnexions universelles : ces voies incluent des segments verticaux et horizontaux qui encadrent chaque bloc logique de base et peuvent être connectées entre elles à travers une matrice de communication.
2. Les voies directes : elles créent des liaisons entre les blocs logiques de base voisins ainsi qu'entre ces blocs et les interfaces d'entrée/sortie.
3. Les voies étendues : ces voies, à la fois verticales et horizontales, ne passent pas par les matrices de communication. Elles traversent toutes les zones d'interconnexion et servent à acheminer les signaux qui doivent parcourir de longues distances. Ces voies sont particulièrement conçues pour le routage des signaux d'horloge.

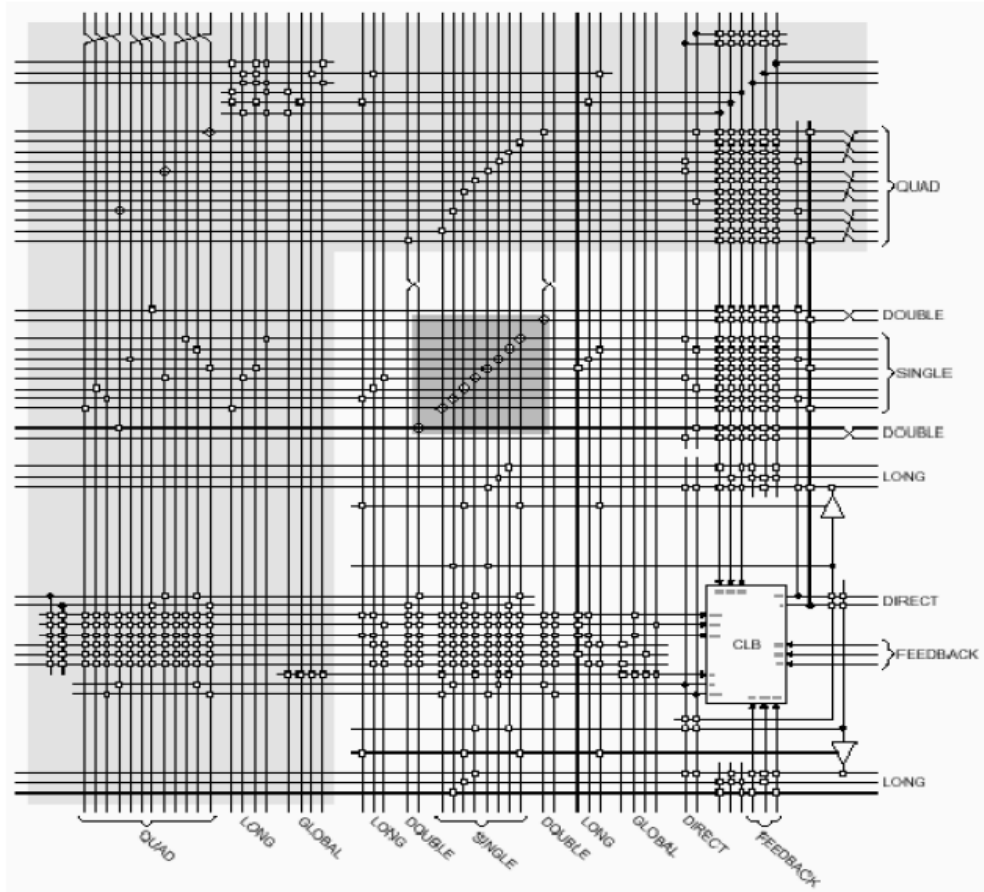


Fig. 4.10 Visualisation des diverses formes d'interconnexions chez Xilinx.

En plus de la diversité architecturale, deux types de FPGAs sont présents (TAV, 1996) :

1. Les FPGAs de type SRAM, désignés LCA chez XILINX et FLEX chez ALTERA.
2. Les FPGAs à antifusibles, notamment proposés par Texas Instruments et ACTEL.

Ces deux technologies diffèrent principalement dans la façon dont leurs interconnexions sont établies (TAV, 1996) (LAU, 1997).

1. Les FPGAs de type SRAM : Introduits dès 1985 par Xilinx, ces composants sont configurés à travers deux éléments : la définition des interconnexions, réalisée par des cellules SRAM, et les fonctions booléennes définies dans des mémoires SRAM. La configuration est volatile, nécessitant une reprogrammation après chaque mise sous tension. Les données de programmation proviennent soit d'une ROM (mémoire en lecture seule), soit d'un système intelligent (microprocesseur ou microcontrôleur).

2. Les FPGAs à antifusibles : Apparue en 1990, cette technologie diffère des autres FPGAs car elle n'est pas reprogrammable et possède une architecture interne distincte. Elle

est principalement proposée par Texas Instruments. L'architecture générale de ces FPGAs est similaire à celle des LCA, avec des blocs d'entrée/sortie disposés autour de la puce. Au centre se trouvent des blocs logiques organisés en matrice, ainsi que des lignes d'interconnexion. Cependant, les similitudes s'arrêtent là. Alors que les LCA utilisent des cellules logiques de base relativement complexes, les FPGAs à antifusibles recourent à des cellules très simples. On peut citer les familles TCP 10XX et TCP 12XX de TEXAS INSTRUMENT comme référence.

4.6. Les langages de description matérielle HDL (Hardware Description Languages) :

4.6.1. Évolution des langages de description matérielle HDL :

Le développement de la description matérielle a évolué en parallèle avec les progrès constants de l'informatique et des technologies toujours plus densément intégrées en termes de transistors. Les langages de description matérielle ont suivi quatre étapes distinctes pour atteindre leur niveau de maturité actuel :

Première phase : Conception à l'échelle du micron.

Au début, la création de circuits intégrés se faisait manuellement. Les éléments constitutifs (transistors) étaient dessinés à la main sur du papier spécial (Mylar) avec des crayons de couleur, dans une méthode connue sous le nom de "dessin au micron". Cela limitait la complexité des dispositifs qui pouvaient être conçus.

Deuxième étape : Émergence des langages de description.

À mesure que la technologie microélectronique évoluait vers une intégration de plus en plus dense de transistors, la demande en outils de conception devenait de plus en plus pressante. C'est ainsi que les langages de description matérielle (HDL) ont fait leur apparition. Ils avaient pour objectif de modéliser et de simuler, tout en facilitant la conception. Des outils informatiques (placeurs-routeurs) étaient utilisés pour convertir automatiquement une description textuelle en schémas. Cela permettait aux concepteurs de résoudre les problèmes à un niveau d'abstraction plus élevé en manipulant des éléments fondamentaux composés d'environ une dizaine de transistors : les portes logiques.

Troisième étape : Adoption des schémas.

L'introduction des interfaces graphiques et des éditeurs de schémas a simplifié le processus de conception des circuits intégrés. En effet, il est généralement plus facile de lire et de comprendre un schéma que de se référer à une description textuelle. Par conséquent, la description textuelle a progressivement laissé la place à une approche schématique.

Quatrième étape : Abstraction fonctionnelle.

Les langages de description fonctionnelle (ou comportementale) du matériel ont répondu aux besoins fondamentaux des concepteurs de circuits intégrés en permettant une modélisation à un niveau d'abstraction supérieur. Cette évolution a engendré plusieurs avantages notables :

- Réduction des délais de conception.
- Accélération des simulations de plus en plus complexes.
- Normalisation des échanges : l'utilisation de langages normalisés et largement reconnus facilite les collaborations entre acteurs industriels, fournisseurs et clients. Parmi ces langages, on peut citer Verilog, VHDL et System C.
- Anticipation : les modèles HDL permettent de concevoir un système même lorsque ses composants ne sont pas encore disponibles.
- Fiabilité : les langages HDL sont conçus pour minimiser les risques d'erreur.
- Portabilité : les langages normalisés offrent une grande portabilité.
- Maintenabilité et réutilisabilité : les modifications et adaptations sont simplifiées, ce qui réduit les risques et les coûts.

L'augmentation significative du nombre de portes intégrées (plusieurs millions) sur une seule puce a rendu impératif le développement d'outils encore plus puissants : les synthétiseurs logiques. La représentation du dispositif à modéliser ou à concevoir est désormais basée sur sa fonction plutôt que sur sa structure. Le synthétiseur logique détermine automatiquement la structure à partir de la fonction (COM, 2011).

4.6.2 Rôle des langages de description matérielle (HDL) :

Il existe deux avantages principaux lors de la conception à l'aide des HDLs:

1. Simulation : L'objectif principal de la modélisation est la simulation, avec deux aspects essentiels à prendre en compte :

- Fidélité : Un modèle doit viser à être aussi précis que possible dans son domaine d'application défini.

- Efficacité : Le modèle doit être rapidement et facilement simulé, portable, réutilisable et simple à maintenir.

Pour simuler un modèle, il est nécessaire non seulement de disposer du modèle lui-même, mais également des stimuli, c'est-à-dire la description des signaux d'entrée du modèle au fil du temps. Ces stimuli sont appelés des bancs d'essai. Les langages de description matérielle fonctionnels simplifient le processus de conception en analysant automatiquement les résultats de la simulation.

Un environnement complet de simulation comprend trois composants : un générateur de stimuli, un modèle de l'objet à simuler et un vérificateur automatisé des résultats. Tous ces éléments sont modélisés en utilisant le même langage.

2. Synthèse : Les langages de description matérielle fonctionnels sont également utilisés pour la conception. L'objectif évolue de la modélisation pour la simulation à la description des objets qui seront effectivement fabriqués. Bien que les considérations relatives à la vitesse d'exécution en simulation restent présentes (la description sera simulée avant d'être soumise au synthétiseur pour garantir l'obtention de la fonction souhaitée), elles ne sont plus primordiales. Ce qui compte le plus, c'est l'efficacité du code en termes de synthèse. En essence, l'accent est mis sur l'optimisation du code afin que le synthétiseur produise la description structurelle la plus économique possible (et donc l'empreinte de silicium la plus réduite possible) (COM, 2011).

4.6.3 Illustrations de langages de description matérielle (HDL) :

De nombreux langages HDL sont disponibles, et bien qu'ils présentent des différences, ils partagent tous les objectifs définis par les principaux principes des langages HDL. Parmi ces langages, on peut citer VHDL, Verilog, SystemC, SystemVerilog, et bien d'autres encore.

4.7. VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language):

Au départ, bien avant l'émergence du VHDL, le programme VHSIC (Circuits Intégrés à Très Haute Vitesse), lancé par le département de la Défense des États-Unis dans les années 1970-1980, a donné naissance à un langage connu sous le nom de VHSIC-HDL ou VHDL. Deux normes successives (IEEE-1976-1987 et 1993) ont stabilisé sa définition, avec des extensions plus récentes ou à venir. Une évolution prévue consiste à créer un langage commun analogique-numérique, où le VHDL, dans sa forme actuelle, jouerait le rôle de la partie numérique (JAC, 2000).

4.7.1. Verilog :

Vers environ 1984, Verilog a été créé par Gateway Design Automation Inc. à l'origine en tant que langage propriétaire. Il a été initialement conçu pour être utilisé dans leurs simulateurs logiques. Cependant, avec le succès croissant du VHDL, les concepteurs de Verilog ont été encouragés à le transformer en un standard ouvert, ce qui a abouti à son adoption en tant que norme IEEE 1364. Plusieurs versions de ce standard ont été développées, enrichies pour offrir des fonctionnalités comparables à celles du VHDL. La syntaxe de Verilog est largement inspirée du langage de programmation C, bien que cette similitude se limite aux expressions. Cela explique en partie sa popularité et son adoption rapide au sein de la communauté des ingénieurs qui maîtrisent déjà le langage C (WIKI, 2011) (COM, 2011).

4.7.2. Comparaison et Sélection entre VHDL et Verilog :

Lorsqu'on compare VHDL et Verilog, on constate qu'ils sont tous deux conçus pour répondre aux exigences des descriptions en langage de description matérielle (HDL). Cependant, ces deux langages ont été développés en mettant l'accent sur des aspects différents

de la description matérielle. En effet, le langage VHDL se concentre davantage sur l'optimisation du circuit, visant à minimiser son encombrement pour intégrer un maximum de fonctionnalités dans un circuit logique programmable. Cette approche n'est pas sans conséquences, notamment pour les systèmes hybrides (analogiques-numériques) ou les microsystèmes, où un sur-ensemble du VHDL, appelé VHDL-AMS (Very High-Speed Integrated Circuits Hardware Description Language for Analog and Mixed Signal), est nécessaire pour prendre en compte ces aspects complexes (*HAM, 2009*).

Le code rédigé en VHDL tend à être plus long que celui écrit en Verilog pour une même fonction. En revanche, le langage Verilog vise à réduire le temps nécessaire pour créer un code opérationnel, ce qui conduit à des codes plus courts. Cependant, cette réduction de taille peut entraîner une utilisation accrue des ressources par le circuit synthétisé. Il convient de noter que la saturation d'un circuit logique programmable à 50% est souvent satisfaisante pour les concepteurs, tandis qu'une utilisation de 80% (*GIN, 2010*) indique une optimisation plus poussée.

Ainsi, le choix entre VHDL et Verilog dépend des priorités du concepteur et des caractéristiques spécifiques du projet. VHDL privilégie l'optimisation du circuit, tandis que Verilog mise sur la rapidité de mise en place du code opérationnel. Chaque langage a ses avantages et inconvénients, et le choix dépendra des besoins et des contraintes propres à chaque projet (*COM, 2011*).

4.7.3. Le VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language):

Le VHDL, en tant que langage de description matérielle (HDL) qui remplit tous les critères établis pour un langage HDL (consultez la section 2.1 Quatrième étape), présente les avantages significatifs suivants (*JAC, 2000*) :

1. Simulation et Synthèse : Le VHDL permet la création de lignes de code pouvant être soumises à une simulation (simulation fonctionnelle) pour vérifier si le code se comporte conformément à la fonction désirée. Cependant, pour créer un design réalisable, la simulation seule ne suffit pas. Il est impératif d'effectuer la synthèse du code initial. Lors de cette étape, le compilateur traduit le code initial en une représentation à un niveau d'abstraction inférieur. À ce point, le code de haut niveau est converti en portes logiques en fonction du circuit

logique programmable spécifique visé. Le fichier synthétisé doit ensuite subir une simulation (simulation événementielle) pour vérifier si le compilateur (synthétiseur) a respecté les spécifications initiales. Ensuite, le fichier est compilé une seconde fois pour produire le circuit logique qui sera effectivement mis en œuvre. Si nécessaire, une troisième simulation (simulation temporelle) est effectuée pour confirmer que le circuit est demeuré inchangé.

2. Portabilité : Le VHDL cible la portabilité à deux niveaux. En premier lieu, il est portable par rapport au circuit logique programmable, ce qui signifie qu'il peut être utilisé sur n'importe quel circuit logique programmable, sous réserve que la capacité logique nécessaire soit disponible. De plus, il est également portable entre différents compilateurs, ce qui permet de changer de compilateur tout en obtenant le même circuit en sortie du processus.

3. Construction hiérarchique : Cette approche simplifie la conception en divisant les tâches pour atteindre le niveau le plus élémentaire possible, puis en assemblant les blocs.

4. Description fonctionnelle : En complément de l'approche hiérarchique, la perspective fonctionnelle apporte la flexibilité des langages de programmation. Chaque algorithme représente la description interne d'un bloc, situé à n'importe quel niveau de la hiérarchie du schéma global. La perspective fonctionnelle fonctionne de manière concurrente, tandis que la perspective structurelle est séquentielle, dans le contexte informatique (JAC, 2000). Ainsi, un programme VHDL doit être considéré comme l'assemblage parallèle de tâches indépendantes qui s'exécutent simultanément.

4.8.1 Composition d'un programme VHDL comprenant l'entité et l'architecture:

Un opérateur fondamental, un circuit intégré, une carte électronique ou même un système complet sont entièrement définis par leurs signaux d'entrée et de sortie, ainsi que par la fonction interne qu'ils accomplissent (JAC, 2000). Les concepteurs du VHDL ont adopté l'approche suivante : chaque système est traité comme une boîte noire. Cette boîte noire possède des entrées et des sorties. Ils ont nommé cette boîte noire "ENTITÉ". Tout système électronique accomplit des opérations sur les signaux d'entrée pour produire les résultats du traitement en sortie. Ces opérations constituent le contenu de la boîte noire, et ce contenu est désigné sous le nom "ARCHITECTURE".

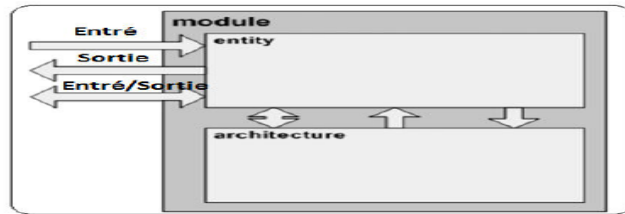


Fig. 4.11 : Architecture fondamentale d'un module en VHDL (WIL, 2011).

Entité ou "Entity" : Dans la section déclarative de l'entité, le circuit est décrit tel qu'il est perçu de l'extérieur, en détaillant ses entrées, sorties et entrées/sorties.

```
Entity <entity name> Is Port (
  <signal name : <signal direction> <data type>;
End <entity name>;
```

Fig. 4.12. Structure déclarative de l'entité.

Architecture : L'architecture définit le comportement attendu du circuit ou les opérations qu'il doit exécuter. Une architecture est toujours associée à une entité (elles sont indissociables).

```
Architecture <architecture name> Of <entity name> Is
  <Define signals and constants>
Begin
End <architecture name>;
```

Fig. 4.13. Structure déclarative de l'architecture.

C'est dans cette partie que le code est élaboré. Un code comprend principalement les éléments suivants : les signaux internes, les opérateurs logiques (qu'ils soient synchrones ou concurrents), et les processus (JAC, 2011). La description d'une architecture peut adopter trois formats différents :

Description comportementale : Cette forme de description détaille le comportement du composant ou du circuit à créer en utilisant des instructions séquentielles ou en adoptant un flux de données (constituant ainsi un processus).

Description structurelle : Ce type de description consiste à énoncer les interconnexions des composants qui ont été préalablement décrits. Cette description correspond à une transcription directe d'un schéma.

Description mixte : Cette approche combine les deux types de descriptions mentionnés précédemment. Chaque entité peut être associée à une ou plusieurs architectures, cependant, lors de l'exécution (simulation, synthèse...), seule une architecture est utilisée.

4.8.2 Composants du langage VHDL:

Le Signal : Il est représenté par des types de données spécifiques et est attribué par un nom et un type de données de la manière suivante :

Signal "nom_signal" : "type_donné" ;

L'utilisation du terme "Signal" informe implicitement le compilateur de convertir le signal en un canal d'interconnexion.

Les Constantes : Une constante est un élément qui porte une valeur dès son initialisation et la maintient tout au long de l'exécution du programme. Elle est déclarée à l'aide du mot-clé "Constant".

Les Variables : La valeur d'une variable est immédiatement mise à jour lorsqu'elle est assignée. Une variable peut être déclarée à l'intérieur d'un processus ou d'un sous-programme, et elle est locale à sa portée de déclaration. Les variables sont utilisées dans le contexte de la programmation séquentielle. La déclaration d'une variable se présente comme suit :

Variable "nom_variable" : type "expression initiale" ;

Les Types de Données : Le VHDL est un langage fortement typé. Chaque élément utilisé (signal, variable) doit posséder un type précisément défini. Toutes les opérations doivent être effectuées avec des objets du même type. En VHDL, les types de données sont normalisés et sont référencés par des noms tels que `std_logic`, `std_logic_vector`, `bit`, `bit_vector`, etc. Ces types de données sont regroupés dans les bibliothèques par défaut.

L'utilisateur a la possibilité de créer ses propres types de données et de les incorporer dans une bibliothèque. Le tableau ci-dessous présente les valeurs acceptées par le type standard logic vector.

Value	Description
0	Low or logic zero
1	High or logic one
W	Weak unknown signal
L	Weak low
H	Weak high
U	Unknown or uninitialized
Z	High impedance
X	Unknown
-	Don't care

Le Processus : il est utilisé pour décrire des instructions parallèles qui font usage des mêmes signaux. On peut considérer un processus comme un sous-programme en boucle infinie, qui ne se termine que lorsque l'instruction de synchronisation wait (attendre) est atteinte. L'instruction de processus est généralement accompagnée d'une liste de sensibilité (horloge, bit d'activation ou de sélection, etc.) et elle est exécutée lorsque l'un des signaux de la liste de sensibilité change d'état.

Les instructions concurrentes, inscrites directement dans le corps de l'architecture, visent à assigner des valeurs à des composants ou à établir des connexions. Elles ne suivent pas d'ordre d'exécution spécifique et opèrent en parallèle.

D'autre part, **les instructions séquentielles** sont employées à l'intérieur des processus, des procédures, et des fonctions (sous-programmes) et constituent une base fondamentale pour les descriptions comportementales. La plupart de ces instructions s'inspirent des langages de programmation classiques. Elles comprennent notamment "if-then-else" pour créer des branches conditionnelles, "case-then" pour évaluer des valeurs et choisir les opérations à exécuter en conséquence, et "wait" pour suspendre l'exécution d'un processus jusqu'à ce qu'une durée spécifiée soit atteinte. Des boucles comme "for-loop" et "while-loop" sont également incluses.

Les attributs : Ce sont des attributs ou des caractéristiques liées à un objet ou à un type. Ils peuvent être soit prédéfinis, soit créés par l'utilisateur. Les attributs sont déclarés de la manière suivante : `Nom_var'nom_attribut ;`

Les Librairies et les Paquetages : Les bibliothèques jouent un rôle crucial dans la portabilité et la réutilisation des programmes. Une bibliothèque est composée d'un ou plusieurs paquets, qui contiennent des fonctions, des procédures, des constantes, des types, etc. Ces bibliothèques sont fournies soit par l'IEEE en tant que défenseur du standard VHDL, soit créées par le concepteur lui-même. La syntaxe déclarative est la suivante :

Déclaration de la bibliothèque : `Library IEEE ;`

Utilisation d'un paquetage spécifique : `Use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL ;`

4.8.3 Disposition d'un programme en VHDL :

La structure d'un programme rédigé en VHDL suit généralement le schéma suivant :

1. Entête : Cette section, bien que facultative, contient des informations sur le programmeur, une description globale du programme, la date de rédaction et toute autre information pertinente pour le rédacteur du programme.

2. Déclaration des bibliothèques : Ensuite, les bibliothèques et les paquetages nécessaires au programme sont déclarés. Cela permet de référencer les éléments nécessaires pour la description.

3. Déclaration d'entité : La troisième étape consiste en la déclaration de l'entité, spécifiant les signaux qui seront utilisés dans tout le programme ainsi que leur direction (entrée, sortie, entrée/sortie).

4. Déclaration d'architecture : Immédiatement après l'entité, l'architecture correspondante est déclarée. Cette section décrit en détail le comportement de l'entité. On y retrouve la déclaration des signaux internes ainsi que des variables propres à cette architecture. C'est dans cette partie que le code est rédigé et mis en œuvre. Voir la Figure 4.14 pour une représentation visuelle.

Il est à noter que cette structure fournit un cadre ordonné et cohérent pour la création de programmes en VHDL.

```
Library IEEE;
Use IEEE.std_logic_1164.all;

Entity <entity name> Is Port
  (<list of ports or design inputs and outputs>);
End <entity name>;

Architecture <architecture name> Of <entity name> Is
  <in this section define signals and constants>

Signal <signal name>          : Data Type;

Begin
  <concurrent statements>
  <process name>: Process (sensitivity list)
  Begin
    <sequential statements>
  End;
End <architecture name>;
```

Fig. 4.14 : Structure d'un programme sous VHDL (GIN, 2010).

4.8.4. Les TESTBENCHS :

La plupart des simulateurs logiques offrent la possibilité de créer des stimuli pour vérifier le comportement d'un modèle. Souvent, un langage de commande permet à l'utilisateur d'automatiser les opérations nécessaires aux tests en créant des fichiers contenant des instructions correspondantes. Le langage VHDL, étant un langage de modélisation et de simulation, englobe tous les éléments requis pour générer des stimuli et analyser les résultats. L'élaboration d'un TESTBENCH nécessite une liste complète de cas possibles. Les stimuli représentent les entrées appliquées au programme par le simulateur pour émuler le comportement des véritables entrées. Après l'exécution du simulateur, les sorties sont examinées pour vérifier si elles correspondent aux attentes du programme, et tout cela sans engendrer de risques pour le matériel (FPGA, par exemple) (JAC, 2000).

4.9. Implémentation d'un contrôleur ANFIS sur FPGA

En cours de production de la serre, le contrôle du climat de serre est un outil utilisé pour la manipulation du rendement des cultures qui maximise les avantages entrepreneuriales. Une fois les objectifs qui permettent d'optimiser la croissance des cultures et le développement sont définis, l'ingénieur de contrôle doit concevoir et mettre en œuvre des systèmes de contrôle automatiques qui rendent possible d'obtenir un rendement

maximum de la culture à des coûts de production minimaux. En ce sens, l'ingénierie de contrôle a connu un développement considérable. Les chercheurs ont utilisé de nombreuses techniques de contrôle dans différents domaines, des stratégies conventionnelles ou classiques [dérivée intégrale (PID) commande proportionnelle, cascade], l'intelligence artificielle (AI) (commande floue, réseaux de neurones et algorithmes génétiques), les techniques de contrôle de pointe (commande prédictive, adaptation), à des stratégies de contrôle robustes, non linéaire et un contrôle optimal. Plus précisément, elles ont été appliquées dans le domaine de la climatisation à effet de serre (Lees et al., 1996) (Hanan J., 1998) (Tap F., 2000). Techniques de contrôle classiques sont difficiles à mettre en œuvre dans les systèmes à effet de serre du fait de leur nature multi-variable et non-linéaire. Où interrelations entre les variables internes et externes sont complexes (phénomènes physiques non-linéaires qui régissent ces systèmes dynamiques sont complexes). Ceci fournit la justification de l'utilisation de techniques de contrôles intelligents comme une bonne alternative. De cette façon, la logique floue dans le cadre des techniques d'intelligence artificielle est une approche intéressante et bien établie pour résoudre les problèmes de contrôle (Lee C C., 1990).

Nous avons entrepris le développement d'un système de contrôle neuro-flou pour réguler l'humidité et la température internes d'une serre. Ce système vise à caractériser le fonctionnement complexe de la serre en tant que système global. L'élément central de cette étape est l'identification, qui implique la recherche d'une représentation mathématique minimisant les écarts entre le système modélisé et l'installation réelle. Les variables climatiques et environnementales exercent une influence majeure sur le développement des plantes. La serre, qui forme un environnement contrôlé où les variables climatiques peuvent être gérées, offre une solution optimale pour favoriser la croissance des plantes. Outre la création de conditions propices à la croissance, la serre doit également offrir une flexibilité pour ajuster le calendrier de production en termes de précocité et de répartition sur la période. Dans cette optique, l'utilisation d'un modèle solide basé sur des réseaux de neurones artificiels et de la logique floue s'avère adaptée pour réguler le comportement non linéaire du climat de la serre, répondant ainsi à des exigences cruciales (Draoui B., 1994).

Pour la mise en œuvre de technologies agricoles (innovations dans les systèmes de contrôle, la surveillance à distance, la gestion de l'information), la robustesse, à faible coût et les capacités en temps réel sont nécessaires. En ce sens, le terrain réseaux de portes programmables (FPGA) se sont révélés comme une bonne option pour le développement et la mise en œuvre de la technologie à effet de serre, parce FPGA permettent le développement rapide de prototypes et la conception de systèmes matériels complexes. Ces dispositifs sont utilisés dans de nombreuses applications réelles (Vega-Rodriguez et al., 2004). Grâce à des FPGA, des tests rapides, des modifications accomplies, up-dates à l'aide des modifications logicielles simples et un coût de production efficaces (rapport performances-prix est très favorable) sont obtenus. Dans le même sens, la réduction dans le développement et la commercialisation de temps est accompli. D'autre part, la mise en œuvre de commande neuro-floue, qui repose sur le logiciel ou le matériel, les FPGA sont une alternative qui gardent les avantages, la vitesse du matériel et la flexibilité du logiciel. La recherche faite au sujet de ces dispositifs a connu un énorme développement, dans le domaine universitaire ainsi que dans la zone industrielle. Il y a un grand nombre de contributions sur les applications FPGA dans différents domaines (Ali L et al., 2004) (Romero-Troncoso R et al., 2004) (Mendoza-Jasso J et al., 2005). En outre, il y a des contributions déclarées au sujet des réalisations matérielles de neuro-flou contrôle (Dipali L.Gaikwad; Prabha Kasliwal, 2013). En outre, les problèmes de contrôle de la neuro-flou numérique ont été étudiés (Dhananjay E. Upasani, 2010). L'approche proposée ici est axé sur le développement des technologies à effet de serre, sur la base de techniques d'intelligence artificielle, en particulier la logique floue, en cascade avec un feed-forward un réseau de neurones, et système sur une puce (SoC) applications utilisant la technologie FPGA, dans le but de l'obtention de solutions d'ingénierie complètes sur un seul circuit intégré. Dans notre cas, un SoC intelligente a été développé pour effectuer la fonctionnalité parfaite pour le contrôle de la température à effet de serre grâce à un système de ANFIS qui vise à fournir un modèle linguistique pour l'estimation du climat à effet de serre à partir des données et de contrôle des actionneurs météorologiques pendant 48 jours de semis croissance intégré dans le réseau neuronal entraîné et optimisé en utilisant la rétro-propagation et l'algorithme des moindres carrés avec 500 itérations.

4.9.1. Contrôleur neuro flou de climat interne de la serre

Comme cela est déjà connu d'après les principes de neuro-flou, un contrôleur flou neuro agit comme un système non linéaire capable de mettre en oeuvre le raisonnement expert pour le calcul des valeurs de contrôle. En effet, un contrôleur flou neuro qui est définie par un ensemble de règles linguistiques et ensembles flous ont été formés par le réseau de neurones et optimisé en utilisant l'arrière-propagation et l'algorithme des moindres carrés est en mesure de calculer les valeurs appropriées pour effet actionneurs (chauffage, ventilation) en prenant en compte des données d'information du système de contrôle propose. Dans la serre expérimentale, la température est contrôlée au moyen d'appareils de chauffage, tandis que le taux d'humidité est contrôlé indirectement par la régulation de l'indice de ventilation. Cela influe sur la température et l'humidité. En utilisant le modèle physique, un simulateur de système complet est montré dans (Fig. 4.15). Avec ce simulateur, une première expérience a été réalisée en utilisant un dispositif de commande classique (on-off) avec une zone morte de 2°C ; ceci est basé sur un système de chauffage qui est activé ou désactivé lorsque l'erreur est supérieure à la plage de réglage fixe. L'humidité dépend de la température de l'air interne et l'indice de ventilation. Cette variable est régulée par des fenêtres d'ouverture dans la serre en fonction des mesures de la vitesse du vent.

Dans ce cas, une des entrées multiples, sorties multiples (MIMO) de commande non linéaire pour la régulation de la température a été utilisé. Un contrôleur flou MIMO neuro peut être distribué dans plusieurs entrées multiples, sortie unique (MISO) contrôleurs en gardant la même performance. Ces contrôleurs sont indépendants et peuvent être exécutées en parallèle, ce qui est souhaitable pour la mise en œuvre du contrôleur climatique dans un FPGA. Le Contrôleur Brouillé Neuro dispose de six variables d'entrée et deux variables de sortie, caractérisé par trois ensembles flous dans l'univers du discours.

Les variables d'entrée sont à l'intérieur et la température extérieure (T_i , T_e), à l'intérieur et de l'humidité à l'extérieur (S_i , S_e), le rayonnement global (G_r) et la vitesse du vent (W_s). fonctions d'appartenance des ensembles et leurs modifications appropriées ont été obtenus à la suite d'une stratégie d'essai et d'erreur en faisant des simulations exhaustives dans Matlab jusqu'à atteindre une bonne performance grâce à un réglage prudent. (Fig. 4.16), montre un exemple de fonctions d'appartenance définies pour l'entrée. Pour celui-ci, trois

variables linguistiques ont été utilisés (MIN, minimum; MOY, moyen; MAX, maximum). L'ensemble de règles floues pour développer le contrôleur pour chaque variable a été obtenue à partir de l'agriculteur expert. Pour affiner les règles floues ainsi que pour les fonctions d'appartenance définit une stratégie d'essai-erreur (réglage manuel) a été utilisé, cela est en train de modifier des ensembles de règles de contrôle jusqu'à ce que nous parvenir à une bonne performance de l'unité de commande en utilisant l'éditeur ANFIS (système de simulation) . Chaque valeur linguistique possible des entrées est affectée à une action en conséquence.

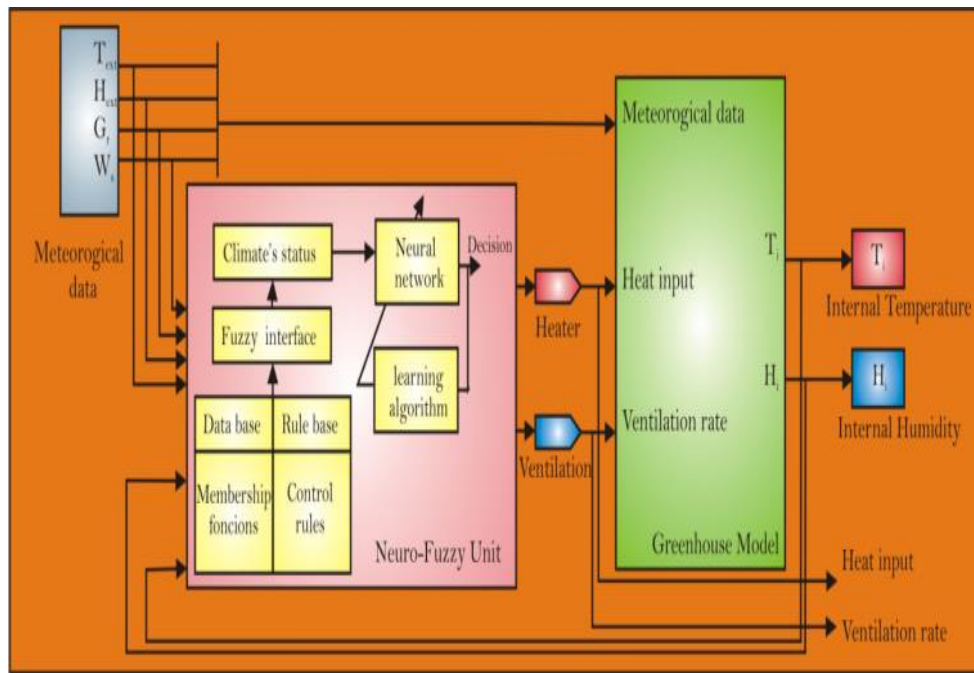


Fig. 4.15. Le modèle global de la serre

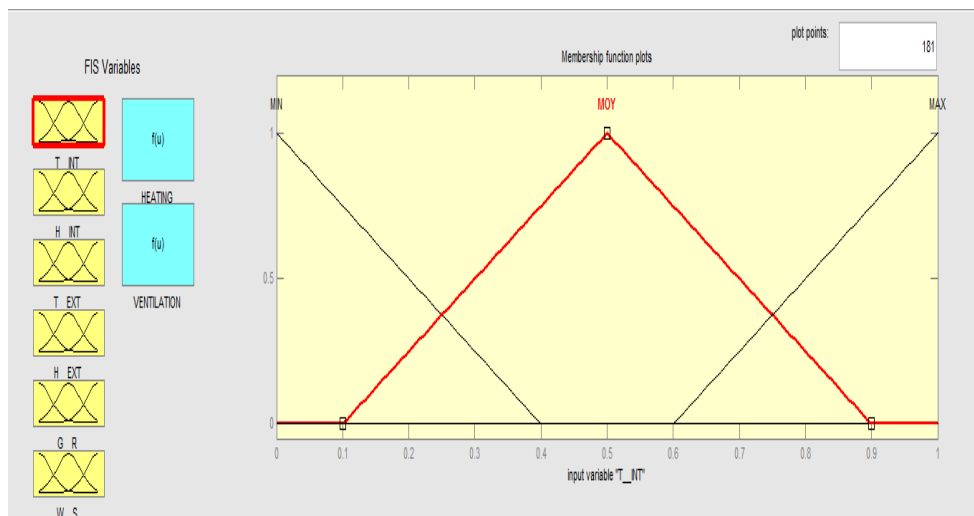


Fig. 4.16. Fonction d'appartenance de la température interne

4.9.2. Conception et Implémentation

Le contrôleur flou Neuro représenté sur la (Fig. 4.17), a été implémenté sur un FPGA. La plate-forme matérielle utilisée est le développement et l'éducation carte Altera DE2 qui est basé sur la Altera Cyclone II FPGA EP2C35F672C6.

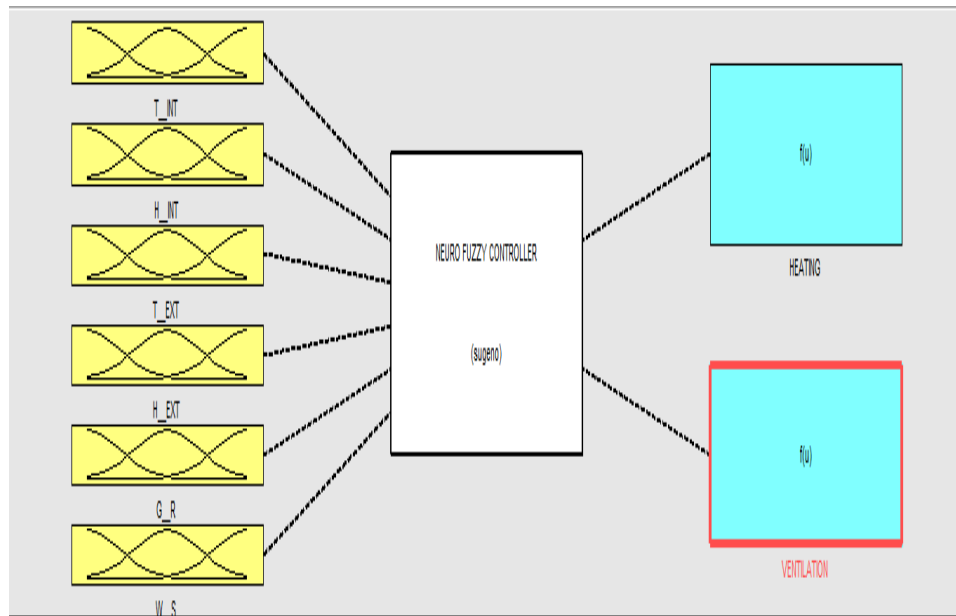


Fig. 4.17. Le contrôleur neuro-flou

Pour implémenter notre application, la conception se décompose en modules.

A. Le démultiplexeur

Le système devrait accepter de multiples entrées de 8 bits au total de 48 bits. Afin de réduire le nombre de broches utilisées dans FPGA nous avons fait un démultiplexage comme le montre la (Fig. 4.18), il a une entrée de 8 bits et trois lignes de sélection, afin d'apprendre à chaque impulsion d'horloge d'une entrée et il règle la question dans une mémoire tampon. Après six horloge sommet, il va acquérir toutes les entrées. Lors de la septième impulsion d'horloge, il délivre le signal de validation et les valeurs des entrées de multiples vers le reste du système.

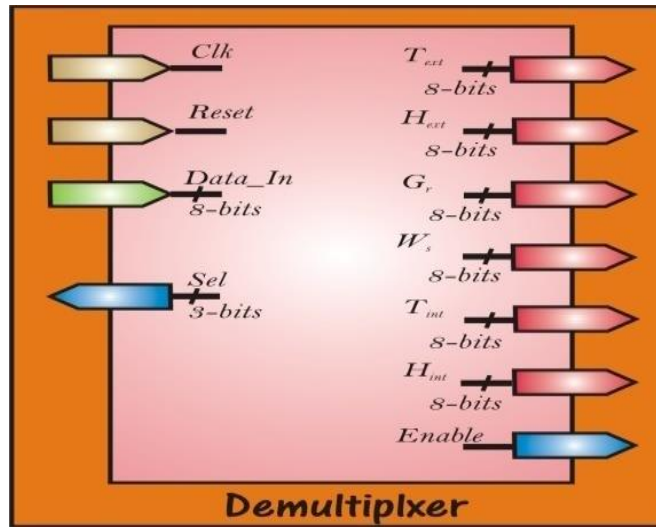


Fig. 4.18. Le démultiplexeur

B. Le module de Fuzzification

Dans cette section, nous avons réalisé six blocs, où chaque bloc est destiné à l'une des fonctions associatives. L'exemple d'une telle séquence est présentée dans la figure, on utilise la température extérieure donnée dans (Fig. 4.19). Les blocs ont transformé les données numériques à trois variables linguistiques (MIN, MOY, MAX). Pour la mise en œuvre facile et que nous avons trois cas, deux bits sont utilisés pour concrétiser ces cas comme suit (min => 10, moy => 00 et max => 11).

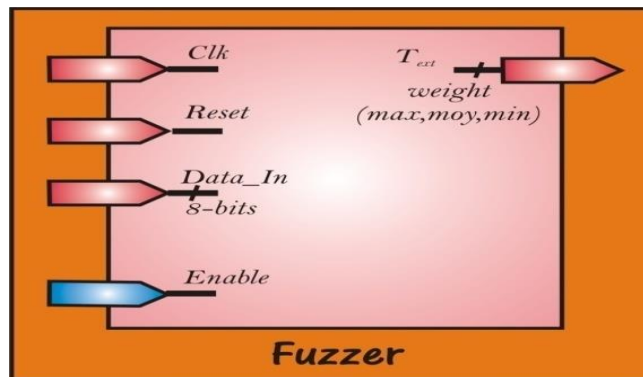


Fig. 4.19. The fuzzier module

C. Le module de commande

L'opération suivante est de l'ordre de la ventilation et de chauffage. Ce composant représenté sur la (Fig. 4.20), admet au niveau des entrées des différentes décisions pour les

entrées multiples et il va calculer les règles de notre structure de FIS obtenu par Matlab Toolbox Fuzzy Logic. Pour réduire l'utilisation de la ressource matérielle, machine à états finis (FSM) est adoptée pour modéliser ce processus de calcul. Enfin, il va transformer les valeurs de la linguistique sur les valeurs binaires.

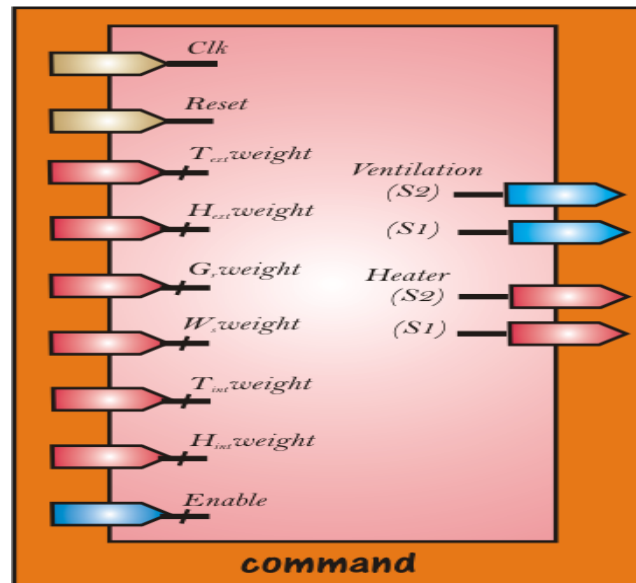


Fig. 4.20. Le module de commande

4.9.3. Résultats et Discussion

La prochaine étape est la simulation de la conception pour illustrer comment cela fonctionne. (Fig. 4.21), Montre le calendrier global de simulation obtenus par Quartus II version 8.1 de SJ édition Web. 'Data' sont les valeurs d'entrée des informations, (T_{int}, T_{ext}, H_{int}, H_{ext}, W_s et R_g) sont les valeurs des paramètres déférents, (fuz_Tint, fuz_Text, fuz_Hint, fuz_Hext, fuz_Ws et fuz_Rg) sont la résultante de tous les membres les fonctions. «Cmd-H-W 'est la valeur finalement sortie représentent la ventilation et le chauffage.

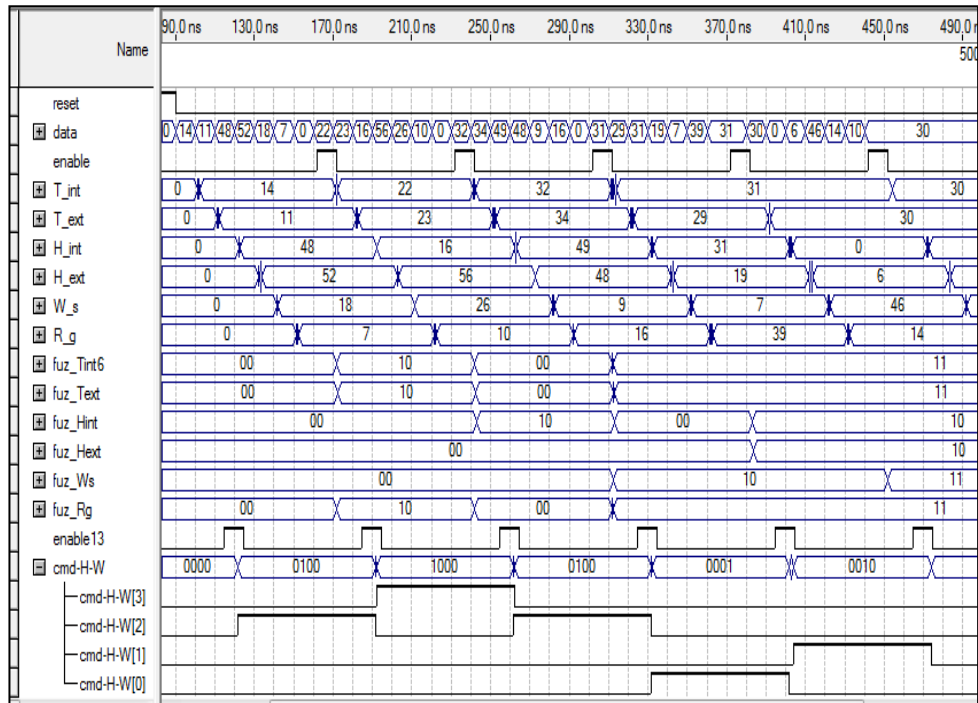


Fig. 4.21. Contrôleur neuro-flou, simulation Quartus II

Le tableau. 4.1 montre la forte similitude entre les résultats obtenus par Matlab environnement Toolbox Fuzzy Logic et ceux obtenus dans l'implémentation. Elle montre le meilleur fonctionnement de tous les modules. Nous pouvons également voir comment la transformation de ces données à partir des valeurs linguistiques à des valeurs numériques.

Tableau. 4.1 Comparaison des résultats donnés par Matlab Fuzzy Logic Toolbox et ceux obtenus avec Quartus II.

Meteorological data				Greenhouse data		Decision control			
T_ext	H_ext	G_r	W_s	T_int	H_int	Heating S2	Heating S1	Ventilation S2	Ventilation S1
MIN	MOY	MIN	MOY	MOY	MOY	MAX		MIN	
10	00	10	00	00	00	1	0	0	0
MOY	MOY	MOY	MOY	MOY	MIN	MOY		MIN	
00	00	00	00	00	10	0	1	0	0
MAX	MOY	MAX	MIN	MAX	MOY	MIN		MOY	
11	00	11	10	11	00	0	0	0	1
MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MIN		MAX	
11	10	11	10	11	10	0	0	1	0

Synthèse du réseau neuronal flou sur FPGA:

Nous avons mis en place la conception en utilisant la carte DE2, contenant dispositif Cyclone®II 2C35 Altera FPGA, EP1C6Q240. Les principales caractéristiques de Cyclone II FPGA EP2C35 sont les suivantes:

- 33216 Logic elements.
- 105 M 4K RAM blocks.
- 483,840totalRAMbits.
- 35 embedded 1818 multipliers.
- Four PLLs.
- 475 user I/O pins.

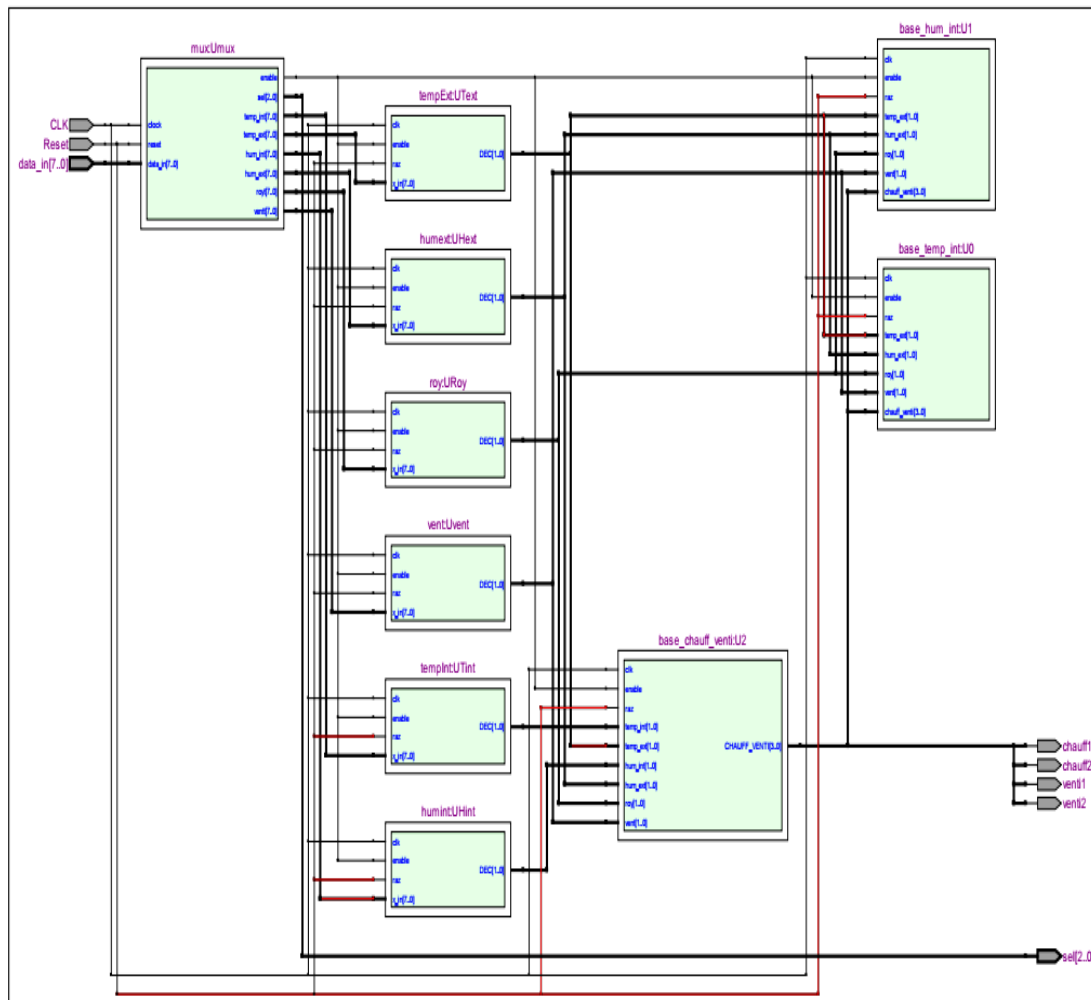


Fig. 4.22. Schématiques RTL de contrôleur neuro-flou

CONCLUSION

Les travaux actuels portent sur l'application de contrôle de la neuro-flou d'un climat interne à effet de serre. Il a démontré avec succès la performance par le biais de co-simulation en utilisant ANFIS et ModelSim. Cette mise en oeuvre reproduit fidèlement le comportement théorique du système, ce qui est prêt à être utilisé. Les travaux futurs seront destinés à améliorer la conception de notre travail, y compris le nombre et le type de fonctions d'appartenance des entrées.

Conclusion générale

Ce travail est structuré en quatre chapitres, le premier chapitre est réservé à la présentation d'une serre dans le cadre générale d'une ingestion informatisée.

La chapitre deux est réservé à la présentation d'un modèle de connaissance de la croissance de la plante : cas de la tomate.

Le chapitre trois est réservé à la présentation d'un outil générique basé sur les concepts de logique floue et les réseaux de neurones pour contrôler le comportement interne d'une serre. Il constitue l'essence même de notre travail : l'application de cet outil générique pour modaliser et contrôler le comportement de l'environnement interne d'une serre basé sur des données réelles.

Le chapitre quatre est réservé à la présentation de l'implémentation d'un contrôleur neuro-flou sur une carte FPGA.

Il est évident que ce domaine est d'approche délicate, il s'agit du contrôle du système MIMO traitant processus (complexe physique et biologique) et dont les paramètres sont fortement corrélés.

Il ne faut pas considérer l'ordinateur comme machine à résoudre tous les problèmes, il ne contient que l'information réunie par les différents partenaires (agronomes, automaticiens, économistes).

Du fait que la technologie nous offre d'énormes possibilités (vitesse de calcul et capacité de stockage), nos limites actuelles proviennent essentiellement :

D'une part de notre connaissance insuffisante des écosystèmes étudiés et d'autre part de la qualité et la quantité des informations disponibles.

Les résultats de modélisation par un outil générique basés sur la logique floue et le contrôle par neuro-flou montrent l'importance des approches de l'intelligence artificielle dans le cadre de la gestion automatisé d'une serre agricole.

La gestion de la production des cultures en serre exploite peu les informations disponibles pour une gestion de production optimale. En utilisant « intelligence artificielle »

On peut intégrer ces informations pour créer les meilleures conditions dans la serre afin d'augmenter la croissance, les rendements et la qualité des produits. On peut donc tirer profit des connaissances existantes, comme des modèles décrivant le taux de croissance des plantes en fonction des paramètres climatiques qui peuvent être régulé par le system. Finalement, on peut mieux contrôler et optimiser la gestion de la température de l'air et l'hygrométrie.

Perspectives :

L'objectif d'un point de vue économique n'est pas d'obtenir une production maximale, mais celui d'optimiser les profits qui sont la différence entre les entrées provenant de la vente des produits agricoles et les couts générés pour les obtenir.

Une solution globale de la production en ingérant les critères économiques ;

Cette conception est constituée de deux couches contrôlant le système composé de la plante et de la serre sur la base de deux échelles de temps différentes.

La première couche résoudre un problème d'optimisation comme une fonction de la production prévue et les couts associés pour la réaliser ou de la date souhaitée de la récolte. Dans cette couche on intègre le modèle économique (évolution de la cour des prix de vente et cout de l'énergie) et le modelé climatique (exploitation des données climatiques fournies d'une part par les prévisions météorologiques sur quatre jours et d'autre part par les archives des années précédentes).

Ce problème de gestion est de maximiser une fonction objective qui représente le profit obtenu basé sur les variables climatiques qui affectent la croissance de la plante, fournissant ainsi les points de réglage, que doivent suivre ces variables climatiques tout le long du cycle de vie de la plante.

La deuxième couche intègre les contrôleurs dont le rôle est de faire évoluer le système aussi près de possible des consignes imposées par la première couche.

En employant une stratégie d'horizon glissant quand les transitions nuit-jour au jour-nuit arrivent, le problème d'optimisation est de nouveau résolu en utilisant les données mesurées des variables climatiques et de croissance de la plante en essayant de minimiser les erreurs provenant des incertitudes de modèle de la plante, des écarts de la prévision météorologiques,

ou les erreurs produites quand les variables climatiques ne peuvent pas atteindre les points de consignes dus aux perturbations ou aux limitations des actionneurs. Ce projet mérite d'être poursuivi en l'intégrant dans un projet global comprenant :

- Modélisation climatique et modélisation économique.
- Optimisation de la croissance des parties de la plante ayant un intérêt commercial (maîtrise de translocation).
- Minimisation des couts énergétiques en développant l'utilisation des énergies renouvelables.
- Développement de la gestion à distance en utilisant les lignes téléphoniques.

Bibliographies

1. Mistriotis A; Bot G P A; Picuno P; Scarascia-Mugnozza G (1997b). Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*,85, 217–228.
2. Berenguel.m, Yebra.Lj, rodrugues, 2003, Adaptative control strategies for greenhouse temperature control, ECC'3, Cambridge, UK.
3. Bidwell.R,G.S, 1964, plant physiology, collier McMillan Publishers London, 643 pp.
4. Brdys.M.A 2002, change, Robust model predictive control under output constraints, 15th IFAC World Congress, Spain.
5. B. Draoui. Caractérisation et analyse du bilan thermo hydrique d'une serre horticole. Identification in situ des paramètres d'un modèle dynamique, Thèse de Doctorat de l'université de Nice Sophia Antipolis, France, 1994.
6. Went, 1944, plant under controller condition, 2 thermoperiodicity in growth and fruiting of the tomatoes. *American journal of botany* 32.469-479.
7. Gent. M, 1988, Effect of diurnal temperature variation on early yield and fruits size of greenhouse tomato. *Applied agronomical Research*, 3, 257-263.
8. Hurd et Graves, 1984, the influence of day and night temperature pattern having the same integral on the earliness and tomatoes. *Acta Horticulturae*. 148.547-554.
9. Heuvelink 1989, influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants, *scientia Horticulturae*, 38, 11-22.
10. Siginer, I. Gary, C ..., 1994. Optimal temperature regimes for a greenhouse crop with a carbohydrate pool, a modeling study. *Scientia Horticulturae*, 60, 55-80.
11. Challa, 1978, programming of night temperature in relation to the diurnal patters of the physiological status of the plant, *Acta hortic*, 76, 147,150.
12. Gent M, Theorne.J.H, Aylor.D.E, 1979, split-night temperature in a greenhouse, the effects on the physiology and and growth of plants. *Bulletin of the Connecticut Agricultural Experiment station*, 781.
13. Clavert et Slack, 1974, Effects of day and night temperature and carbon dioxide enrichment on yield of glasshouse of tomato, *J, Hort, Sci*, 47: 231-247.

14. Acock. B, Acok, M.C, Pasternak, 1990, Interaction of CO₂ enrichment and temperature on carbohydrate production and accumulation in muskmelon leaves. Journal of the American society for Horticultural Science, 115,525-529.
15. Madrep, Derd, 1999, transfert de technologie en agriculture, fiche technique, tomate sous serre N-57,1-4pp.
16. **Yves. C, Christien . N, Robert. B, 1979, la thermique des serres. Edition Eyrolles 66.Bp, Sain-Germain, Paris 5^e pp.353.**
17. Moyses. A, 1950, respiration et métabolisme azoté. Etude physiologie foliaire, relation entre le métabolisme azoté et la respiration des feuilles détachées. Thèse, univ. Paris, éditions Hermann.
18. Ramires .A, Rodriguez.F et Berenguel. M.2003, calibration and validation of complex and simplified tomato growth models for control purposes in the southeast of Spain, Dpto de lenguajes y computation University of Almeria. Ctra de la playa, s/n Almeria Spain.
19. F. Bounaama, Modélisation neuronale et polynomiale d'une serre horticole et commande par réseau neuronale et logique floue, thèse de Doctorat en physique énergétique, centre universitaire de Béchar, 2008.
20. W.S Mc Culloch et W. Pitts, est date de 1943, Le premier modèle mathématique et informatique du neurone biologique.
21. Isabelle R, 1996, les réseaux de neurones formelles pour le pilotage de robot mobiles, Lux, revue de l'association amicale les Ingénieurs SUPLEC, la robotique mobile, la fonction achats logistique, No 178, septembre-octobre 1996, ISSN 0766-3536.
22. Simon B, 2004. Les réseaux de neurones, université du Québec à Montréal,
<http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/ou>
<http://axon.cs.byu.edu/martinez/classes/578/BPTutorial.html>
23. J.-S. Roger Jang, 1995, "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) for Noise Cancellation", in "Proceedings of the International Joint Conference of CFSA/IFIS/SOFT 1995" edited by Weiling Chiang and Jonathan Lee, PP. 127-132, Singapore, World Scientific.
24. B. Kosko, 1994, Fuzzy systems as universal approximators, IEEE Trans. Computers 43, 1329–1333.

25. R. Babuška, 1996, R. Babuška, H.J.L. van Can and H.B. Verbruggen, Fuzzy modeling of enzymatic Penicillin–G conversion, In Preprints 13th IFAC World Congress, Volume N, San Francisco, USA, pp. 479–484.
26. J.S.R. Jang, 1993, ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems. IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics 23(3), 665–685.
27. J.S.R. Jang, and C.-T. Sun, 1993 Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems, IEEE Transactions on Neural Networks 4(1), 156–159.
28. TAV, 1996, TAVERNIER, C. (1996). *Circuits logiques programmables*. PARIS: DUNOD.
29. JAC, 2000, WEBER, J. (2000). *Le langage VHDL*. PARIS: DUNOD.
30. LAU, 1997, DUTRIEUX, L. (1997). *Logique Programmable*. PARIS: EYROLLES.
31. STE, 2005, BROWN, S. (2005). *Digital logic*. Toronto: Mc Graw Hill.
32. GIN, 2010, Smith, G. R. (2010). *FPGA 101*. New York: ELSEVIER.
33. XIL, 2002, Xilinx. (2002). XAPP385. *XILINX APPLICATIONS* .
34. COM, 2011, *comelec.enst.fr/hdl/hdl_historique.html*. (2011). Consulté le juin 2011, sur comelec.enst.fr: <http://comelec.enst.fr/hdl.html>
35. WIKI, 2011, Wikipédia, (2011). *Verilog*. Wikipedia.org: fr.wikipedia.org.
36. HAM, 2009, Rima, H. (2009). Contribution à une plateforme d'aide à la conception de microsystème. LYON, FRANCE: Institut national des sciences appliquées de Lyon.
37. WIL, 2011, KAFIG, W. (2011). *VHDL 101*. OXFORD: ELSEVIER.
38. Lees M J; Taylor J; Chotai A; Young Z S; Chalabi Z S(1996). Design and implementation of a proportional-integral plus (PIP) control system for temperature, humidity and carbon dioxide in a glasshouse. *Acta Horticulturae*, 406, 115–124.
39. Hanan J(1998). *Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture*, 1st Edn. CRC Press, New York, USA.
40. Tap F(2000). Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

41. Lee C C(1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller—(parts I and II). *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*,20,404–432.
42. Draoui B(1994). Characterisation and analyses hydrous assessment thermo of a horticultural greenhouse. In situ identification of the parameters of a dynamic model, Thesis of Doctorate of the university of Nice Sophia Antipolis, France, 1994.
43. Vega-Rodriguez M A; Sanchez-Perez J M; Gomez-Pulido J A (2004). Special issue on FPGAs: applications and designs. *Microprocessors and Microsystems*,28,193–195.
44. Ali L; Sidek R; Aris Ishak; Ali A M; Suparjo B S(2004). Design of a micro-UART for SoC application. *Computers and Electrical Engineering*,30,257–268.
45. Romero-Troncoso R; Herrera-Ruiz G; Terol-Villalobos I; Jauregui-Correa J C (2004). FPGA based on-line tool breakage detection system for CNC milling machines. *Mechatronics*,14,439–454.
46. Mendoza-Jasso J; Ornelas-Vargas G; Castan~eda-Miranda R; Ventura-Ramos E; Zepeda-Garrido A; Herrera-Ruiz G (2005). FPGA-based real-time remote monitoring system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49(2), 272–285.
47. Dipali L.Gaikwad; Prabha Kasliwal (2013). FPGA Based Critical Patient Health Monitoring Using Fuzzy Neural Network. *International Journal of Scientific & Engineering* 2229-5518.
48. Dhananjay E. Upasani (2010). FPGA implementation of intelligent climate control for greenhouse. *International Journal of Computer Applications* (0975 - 8887).

Annexes

Annexe A

La photosynthèse nette (N) à l'instant i :

$$N_i = a (I_i - I_0) - b (C_i - C_0) / a (I_i - I_0) + b (C_i - C_0) \quad (\text{A1})$$

La somme de températures efficaces Σ :

$$\Sigma_j = \sum_{j=J_0}^J (\theta_j - \theta_0) \quad (\text{A2})$$

Cinq sommes de température sont utilisées comme repères pour le calcul du rendement, ce sont des constantes pour chaque variété donnée :

- \sum_1 caractérise l'état initial de la culture à la plantation $\left[\sum_j - \sum_{j_0} \right]$ quand les feuilles sont étalées.
- \sum_2 nouaison du 1^{ier} fruit
- \sum_3 maturation du 1^{ier} fruit.
- \sum_4 sénescence du végétal ($\mathbf{J}=\mathbf{J}_k$)
- \sum_5 somme de température entre chaque nouaison (donc entre chaque récolte)

Efficacité de l'assimilation chlorophyllienne :

Le rapport $\frac{\sum_j}{\sum_{j_{\max}}}$ fixe le stade du développement de la plante.

$$A_j = 1 - \frac{\sum_j - \sum_2}{\sum_4 - \sum_2} \quad (\text{A3})$$

Influence du taux de recouvrement :

$$K_j = K_{\max} \left(1 - e^{-a_c \sum_j^{j-1} (\theta - \theta_0) \sum_j^{j-1} G_j} \right) \quad (\text{A4})$$

Avec a_c : Coefficient spécifique relatif au couvert.

Floraison-nouaison, Taux de grossissement

$$K_{fj} = K_{f \max} \left[1 - \exp \left(-a_f \sum_{i=jf}^{i=j} (\theta - \theta_0) \right) \right] \quad (\text{A5})$$

Avec,

- J_f : jour de la floraison
- K_{ζ} : % poids de jour J après la floraison
- $K_{f\max}$: poids de la fin de maturation
- a_f : coefficient à déterminer

Les valeurs des paramètres :

Pour :

$$a = 6.34 \cdot 10^{-8} \text{Kg.joule}^{-1}, b = 5.82 \cdot 10^{-2} \text{m.s}, a_f = 0.01^\circ\text{C}^{-1}, I_0 = 5 \text{ Wm}^{-1}, a_c = 1.4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2\text{joul}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$$

- Matière sèche/ CO_2 = 0.72.
- θ_0 : 7.5°C
- $\sum(\theta - \theta_0)$ entre feuille étalées : $50^\circ\text{C} \times \text{jour}$
- $\sum(\theta - \theta_0)$ entre fleurs nouées : $45^\circ\text{C} \times \text{jour}$
- $\sum(\theta - \theta_0)$ nouaison du 1^{er} fruit : $750^\circ\text{C} \times \text{jour}$
- $\sum(\theta - \theta_0)$ maturation du 1^{er} fruit : $1420^\circ\text{C} \times \text{jour}$
- $\sum(\theta - \theta_0)_{\max}$: $2200^\circ\text{C} \times \text{jour}$
- $C_0 = 1.28 \cdot 10^{-2} \text{Kg.m}^{-3}$ $K_{\max} = 0.7$ $\lambda = 3.7 \times 10^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ $\mu = 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{S}^{-1}$
- Matière fraîche/Matière sèche : 22.

Annexe B

Algorithme de rétro-propagation du gradient :

L'un des algorithmes d'apprentissage les plus simples pour les réseaux de neurones multicouches est l'algorithme de rétro-propagation du gradient. Le principe de cet algorithme consiste à réduire une distance quadratique au moyen 'une descente en gradient dans l'espace des poids. Il repose sur un calcul des dérivées partielles.

ETAPE1 : initialiser $W_{ijk}(0)$ à faible valeur aléatoire

(W_{ijk} : est le poids de la connexion entre le neurone i de la couche $k-1$ et le neurone j de la couche K à l'instant t).

ETAPE2 : présentation d'un couple (entrée, sortie désirée).

Présenter un vecteur de valeur continues (x_1, x_2, \dots, x_n) et un vecteur de sortie désirée (d_1, d_2, \dots, d_m).

Où : N : nombre de neurones d'entrée.

M : nombre de neurones de sortie.

ETAPE3 : calcul des états de sortie

$$a_{ik}(t) = \sum_{j=0}^{n_{k-1}} W_{ij}(t) y_{jk-1}(t) \quad (B1)$$

$$y_{ik}(t) = F(a_{ik}(t)) \quad (B2)$$

$a_{ik}(t)$: est l'activation du neurone i de la couche K à l'instant t .

$y_{ik}(t)$: est la valeur de sortie du neurone i de la couche K à l'instant t .

n_{k-1} : est le nombre de neurones de la couche $K-1$.

F : est la fonction d'activation (fonction de transfert).

ETAPE 4 : calcul des gradients associés aux unités de la couche de sortie

$$g_{ik}(t) = -\frac{\partial E(t)}{\partial a_{ik}} = f'(a_{ik}(t))(d_i(t) - y_i(t)) \quad (\text{B3})$$

ETAPE 5 : Calcul des gradients des autres unités. En appliquant couche par couche

$$g_{ik}(t) = f'(a_{ik}) \sum_{n=0}^{nR+1} W_{mik+1}(t) \cdot y_{mk+1} \quad (\text{B4})$$

ETAPE 6 : Mettre à jours les poids

$$W_{ijk}(t+1) = W_{ijk}(t) + \Delta W_{ijk}(t) + \eta \delta_j x_j \quad (\text{B5})$$

η : Le pas d'adaptation « learning rate »

δ_j : terme d'erreur de nœud j.

$$\delta_j = y_d - y_j$$

ETAPE 7 : Si le test de convergence n'est pas satisfait aller à l'étape 2.

L'architecture ANFIS :

➤ **Couche 1**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud adaptatif, où la sortie de ce nœud est définie par :

$$a_{i,1} = B_{1i}(U_1) \quad \text{pour } i = 1, 2 \quad (\text{B6})$$

$$a_{i,1} = B_{2i}(U_2) \quad \text{pour } i = 2, 3 \quad (\text{B7})$$

Avec : $B_{1i}(U_1)$ est le degré d'appartenance de U_1 à sous ensemble flou B_{1i} .

$B_{2i}(U_2)$ est le degré d'appartenance de U_2 à sous ensemble flou B_{2i} .

➤ **Couche 2**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud fixe, où la sortie de cet nœud est définie par :

$$A_{i,2} = w_i = B_{1i}(U_1) * B_{2i}(U_2), \quad i=1,2 \quad (B8)$$

Avec W_1 : représente l'agrégation floue des antécédents dans la règle 'i'.

On peut utiliser l'opérateur t-norme, ou bien AND connective comme fonction de nœud dans cette couche.

➤ **Couche 3**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud fixe, ou la sortie de cet nœud est définie par :

$$a_{i3} = \overline{w}_i = \frac{w_i}{w_i + w_2} \quad (B9)$$

Avec \overline{w}_i : est une normalisation de l'agrégation floue.

➤ **Couche4**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud adaptatif, où la sortie est définie par :

$$A_{i4} = \overline{w}_i v_i = \overline{w}_i (p_i u_i + q_i u_i + r_i), \quad (B10)$$

Avec (p_i, q_i, r_i) l'ensemble de paramètres de modèle flou de Sugéno.

➤ **Couche5**

Chaque nœud dans cette couche est un nœud fixe, où la sortie de cet nœud est définie par :

$$a_{i5} = \overline{w}_i v_i = \frac{\sum_i w_i v_i}{\sum_i w_i} \quad (B11)$$

Algorithme de moindre carré :

Soit la fonction : $V = F(U, S)$ (B12)

Avec U : l'ensemble des variables d'entrée.

S : l'ensemble des paramètres.

S'il existe une fonction linéaire H , tel que $H \circ F$ linéaire par rapport aux sommes des éléments de S , alors on peut identifier ces éléments par la méthode de moindre carré.

$$\text{Si on peut décomposer } S \text{ en deux ensembles : } S=S_1+S_2 \quad (\text{B13})$$

Tel que : $H \circ F$ est linéaire par rapport à S_2

$$\text{D'après (3.12): } H(V) = H \circ F(U, S) \quad (\text{B14})$$

Si on donne des valeurs à S_1 à l'équation (14), on obtient l'équation matrice suivante :

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\theta}=\mathbf{B} \quad (\text{B15})$$

Où : θ représente le vecteur des paramètres inconnus dans S_1

Cette équation représente le problème standard de moindre carré. Et la meilleure solution θ^* est l'estimateur de moindre carré :

$$\boldsymbol{\theta}^* = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{B} \quad (\text{B16})$$

Où : A^T la matrice transposant de A .

$(A^T A)^{-1} A^T$ le pseudo inverse de la matrice A (si : $(A^T A)^{-1}$ est non singulière)

On peut appliquer la formule de moindre carré récursive. Et θ se décrit de la forme suivante :

$$\left. \begin{aligned} \theta_{i+1} &= \theta_i + S_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^t \theta_i) \\ S_{i+1} &= S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}} \end{aligned} \right\} \quad I=0,1,\dots,P-1 \quad (\text{B17})$$

Avec les conditions initiales : $\theta_0=0$, $S_0=\gamma I$ où γ : est un nombre large positif.

Algorithme d'apprentissage hybride (rétro-propagation du gradient et moindre carré) :

On peut remarquer, d'après l'architecture d'ANFIS, si on fixe les paramètres d'antécédent, la sortie finale est une combinaison linéaire de paramètres de conséquents.

$$\begin{aligned}
V &= \frac{w_1}{w_1+w_2}V_1 + \frac{w_2}{W_1+W_2}V_2 \\
&= \bar{w}_1 v_1 + \bar{w}_2 v_2 \\
&= (\bar{w}_1 U_1)p_1 + (\bar{w}_1 U_2)q_1 + (\bar{w}_1)r_1 + (\bar{w}_2 U_1)p_2 + (\bar{w}_2 U_2)q_2 + (\bar{w}_2)r_2
\end{aligned} \tag{B18}$$

Avec $P_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2$ sont les paramètres des conséquentes.

Humidité de l'air interne de la serre :

$$H_i(n+1) = H_i(n) \exp(-\zeta \Delta t) + (1 - \exp(-\zeta \Delta t)) \cdot \left(\frac{rsB \gamma \tau}{\xi} \frac{\chi}{\xi} \frac{\gamma s B}{\zeta} \frac{\gamma s}{\zeta} \right) \left(R_g H_e T_i \phi_l \right)^T \tag{B19}$$

Température de la masse virtuelle (le sol) de la serre:

$$\begin{aligned}
T_{mi}(n+1) &= T_m(n) \exp\left(-\frac{\Delta}{\tau} t\right) + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta}{\tau} t\right)\right) \cdot \\
&\left(\frac{\alpha h + B \gamma}{h(K+K_s)}, \frac{v}{h(K+K_s)}, 1, \frac{l}{(K+K_s)}, \frac{K_l}{(K+K_s)}, \frac{l}{(K+K_l)} \right) \theta
\end{aligned} \tag{B20}$$

Et la température de l'air interne de la serre :

$$T_i(n+1) = \frac{h}{\gamma} T_m(n+1) + \left(\frac{v-h}{v} \frac{\alpha}{v} \frac{l}{v} \frac{K_l}{v} \frac{-K_l}{v} \right) \theta \tag{B21}$$

Annexe C

Travaux et publications :

Articles publiés dans des revues à comité de lecture

- 1- Charaf eddine LACHOURI; Khaled MANSOURI; Mohamed mourad LAFIFI; Aissa BELMEGUENAI. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems for Modeling Greenhouse Climate. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), Vol. 7, No. 1, 2016, 2156-5570.
- 2- Charaf eddine LACHOURI; Khaled MANSOURI; Aissa BELMEGUENAI; Mohamed mourad LAFIFI. FPGA Implementation of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems Controller for Greenhouse Climate. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), Vol. 7, No. 1, 2016, 2156-5570.
- 3- Charaf eddine LACHOURI; Khaled MANSOURI; Mohamed mourad LAFIFI; Greenhouse Climate Modeling Using Fuzzy Neural Network Machine Learning Technique. Revue d'Intelligence Artificielle, Vol. 36, No. 6, December, 2022, pp. 925-930.

Conférences internationales à comité de lecture

- 1- Charaf eddine LACHOURI; Khaled MANSOURI; Mohamed mourad LAFIFI; modelisation et commande neuro-floue du bilan climatique d'une serre horticole application a la tomate, International Conference On Systems And Processing Information May 12-14, 2013, Guelma, Algeria.
- 2- Boumaiza Ahlem; Arbaoui Fayçal; Lachouri Charaf Eddine; détection et localisation des défauts a base d'observateur dans un système éolien, International Conference On Systems And Processing Information May 12-14, 2013, Guelma, Algeria.
- 3- Charaf Eddine Lachouri; Khaled Mansouri; Mohamed Mourad Lafifi; FPGA Implementation of a Neuro-Fuzzy Control of a Greenhouse Internal Climate, international conference on embedded systems in telecommunications and instrumentation october 27 - 29, 2014, Annaba, Algeria.

- 4- Charaf Eddine Lachouri; Khaled Mansouri; Mohamed Mourad Lafifi; Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems for Modeling Greenhouse Climate, International Conference on Automatic, Telecommunication and Signals, November 16 – 18, 2015, Annaba, Algeria.
- 5- Charaf Eddine Lachouri; Khaled Mansouri; Mohamed Mourad Lafifi; FPGA Implementation of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems Controller for Greenhouse Climate, International Conference on Automatic, Telecommunication sand Signals, November 16 – 18, 2015, Annaba, Algeria.