

**UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
Département d'Electronique

# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Signaux et systèmes

## **AUTOMATISATION D'UNE SERRE AGRICOLE**

Par

**Ahmed MEDJBER**

Devant le jury composé de :

A.Guessoum	Professeur, U. de Blida	Président
H.SALHI	Maître de conférences, U. de Blida	Examineur
M.Ould Zmirli	Maître de conférences, C U. de Médéa	Examineur
Z.A. Benslama	Maître de conférences, U. de Blida	Rapporteur
N.Ammour	Chargé de cours, U de Blida	Co-Rapporteur

Blida, 24 juin 2008

## RESUME

Dans ce mémoire, nous avons traité la modélisation et la simulation du climat à l'intérieur d'une serre agricole, l'obtention des modèles de production de serre (climat, développement et croissance des plantes, etc...) est un sujet de grand intérêt de nos jours, une serre constitue un système dynamique très complexe, la température et l'humidité à l'intérieure de la serre sont non linéaires et fortement couplées par les lois thermodynamiques, ce qui est détaillé dans ce mémoire.

Une nouvelle approche à été utilisée (Feedback/ Feedforward) à la linéarisation et découplage pour la commande de climat de notre système (serre) et plus spécifiquement la commande de refroidissement, chauffage et humidification. Pour cela, on va présenter une combinaison puissante des contrôleurs de linéarisation (Feedback et Feedforward), qui sont des contrôleurs dynamiques conventionnels (par exemple : contrôleur PID ou PDF) et contrôleur Flou.

Nous avons appliqué cette approche avec ces contrôleurs pour réguler la température et l'humidité à l'intérieure de la serre.

Mots clés : serre agricole, contrôle de l'environnement, psychrométriques, linéarisation de rétroaction, découplage, systèmes non linéaires.

## ملخص

في هذه المذكرة ' قمنا بوضع نموذج وكذا محاكاة المناخ داخل البيوت البلاستيكية الفلاحية . الحصول على هذا النموذج يعتبر بحد ذاته موضوع مهم في وقتنا الحاضر ' والذي يتكون من نظام ديناميكي معقد جدا .

الحرارة والرطوبة داخل البيوت البلاستيكية مرتبطة لا خطيا فيما بينها وذلك حسب قانون الحركة الحرارية ' وذلك ما نتناوله بالتفصيل هذا العمل .

كما استعملنا مقارنة جديدة (رد فعل رجعي/ رد فعل أمامي) من أجل إزالة اللاخطية وفك ارتباط الحرارة والرطوبة لتسهيل التحكم في المناخ داخل هاته البيوت ' وبصفة أدق التحكم في التبريد ' التسخين والرطوبة ' من أجل هذا نقدم تركيبة قوية من مراقبي الخطية (رد فعل رجعي/ رد فعل أمامي) باعتبارهم مراقبين حركيين اصطلاحيين و مراقب وهمي. (PDF, PID)

قمنا بتطبيق هذه المقاربة بمراقباتها من أجل تنظيم الحرارة والرطوبة داخل هاته البيوت .

**الكلمات المفتاحية:** بيوت بلاستيكية فلاحية ' مراقب محيط فك الارتباط ' نظام لا خطي.

## **ABSTRACT**

In this work we deal modelling and simulation interior climate of the greenhouse, the obtaining of greenhouse models (climate, crop development etc...) is subject of large interest new a days. A greenhouse constitute a complex dynamical system, temperature and humidity are commonly measured air proprieties, highly coupled through nonlinear thermodynamic lows.

A new approach, to system linearization and decoupling for climate control of our system (greenhouse) and more specifically for the operation of heating, cooling and moisturising.

For this, we are going to present powerful combination of controllers of linearization (Feedback and Feed forward), which an conventional dynamic controllers (for example: PID controller or PDF controller and Fuzzy logic controller).

We have applied this approach with these controllers to regulate the temperature and humidity inside the greenhouse.

Key words: Greenhouse, linearization of feedback, decoupling, system of nonlinear, environmental control

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein de l'institut d'Electronique de Blida.

Toute ma gratitude et remerciements au bon Dieu, qui m'a dirigé dans la voie de la science, et m'a donné le courage et la volonté pour arriver à ce niveau.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon promoteur M<sup>er</sup> Z.BENSLAMA qui mon dirigé et encouragé tout au long de ce travail. Je lui adresse mes vifs remerciements.

Je tiens à remercier mon co-promoteur M<sup>er</sup> N. AMOUR pour ses conseils et son aide tout au long de ce travail.

Je remercie très vivement M<sup>er</sup> A. GUESSOUM d'avoir présidé le jury.

Je tiens à remercier M<sup>er</sup> H.SALHI, d'avoir accepté de juger ce travail.

Que M<sup>er</sup> M.OUELD ZMIRLI, d'avoir accepté de juger mon travail.

Je tiens à remercier M<sup>er</sup> A. BEN CHERCHALI, d'avoir accepté de juger ce travail.

Les remerciements iront de même à tous les professeurs qui ont contribué à ma formation, en particulier, ceux du département d'électronique (USTB)

Je remercie vivement Monsieur B.KAZED, chef de département d'Electronique de Blida, M<sup>eur</sup> O. NADJMI, M<sup>eur</sup> K. KARA, M<sup>eur</sup> A. SAADI et M<sup>eur</sup> M. DJENDI pour leurs encouragements et leurs aides.

Mes chaleureux remerciements vont également à tous mes collègues de travail, ainsi qu'à tous les postgraduants de l'institut d'Electronique de Blida.

Enfin, tiens à remercier, du profond de mon cœur, mes parents pour leurs encouragements incessants. Je remercie aussi tous les membres de ma famille

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Serre tunnel.....	13
Figure 1.2	Mini serre adossée .....	14
Figure 1.3	Serre châssis .....	15
Figure 1.4	Système de refroidissement.....	21
Figure 1.5	Humidificateur à buée froide.....	21
Figure 1.6	Système du chauffage (Parasene 3KW) .....	22
Figure 1.7	Système du chauffage (Phoenix 1, 1,8 ou 2,8KW) .....	23
Figure 1.8	Système du chauffage (Thermibox) .....	23
Figure 1.9	Système du chauffage (Système 9000TI).....	24
Figure 1.10	Système d'éclairage.....	24
Figure 1.11	Système d'éclairage (Lampe PL94400) .....	25
Figure 1.12	Système d'éclairage (Lampe PL 94 600) .....	25
Figure 1.13	Ecran d'ombrage à tirage manuel.....	26
Figure 1.14	Système d'aération automatique (Compas).....	27
Figure 2.1	Description Energétique de la serre.....	29
Figure 2.2	Structure géométrique de la serre .....	29
Figure 3.1	Schéma synoptique de la serre agricole. ....	44
Figure 3.2	Schéma de commande avec correcteur de PID .....	45
Figure 3.3	Structure générale de commande IDF .....	48
Figure 3.4	Structure générale de commande PDF .....	48
Figure 3.5	Structure de commande de PDOF appliquée au modèle de processus .....	50
Figure 3.6	Stratégie globale de la commande.....	51

Figure 3.7	Schéma bloc détaillé avec contrôle de la serre.....	54
Figure 3.8	Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixe. ....	55
Figure 3.9	Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes. ....	55
Figure 3.10	Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec ..... changement d'étape de la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.	56
Figure 3.11	Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement d'étape de la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes. ....	56
Figure 3.12	Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques fixes.....	57
Figure 3.13	Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphérique fixes	57
Figure 3.14	Evolution de température et humidité Tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996.....	59
Figure 3.15	Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques tunisienne.....	60
Figure 3.16	Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques tunisienne. ....	60
Figure 3.17	Contrôleur flou du système de refroidissement pour un réglage grossier.....	62
Figure 3.18	Fonctions d'appartenance pour un réglage grossier de la température. ....	63
Figure 3.19	Réglage grossier de température sans changement de consigne. ....	64
Figure 3.20	Réglage grossier de température avec changement de consigne. ....	64
Figure 3.21	Contrôleur flou du système d'humidification pour un réglage grossier de l'humidité.....	65
Figure 3.22	Fonctions d'appartenances des sous ensembles flous de chaque variable linguistique (e, D <sub>e</sub> , u) de contrôle d'humidité.....	66
Figure 3.23	Réglage grossier d'humidité sans changement de consigne. ....	67
Figure 3.24	Réglage grossier d'humidité avec changement de consigne. ....	68
Figure 3.25	Contrôleur flou du système de refroidissement pour un réglage fin. ....	68

Figure 3.26 Fonction d'appartenance de température. ....	70
Figure 3.27 Réglage fin de température sans changement de consigne. ....	71
Figure 3.28 Réglage fin de température avec changement de consigne. ....	72
Figure 3.29 Contrôleur flou du système d'humidification pour un réglage fin ....	72
Figure 3.30 Fonction d'appartenance d'humidité. ....	74
Figure 3.31 Réglage fin d'humidité sans changement de consigne. ....	75
Figure 3.32 Réglage fin d'humidité avec changement de consigne. ....	76
Tableau 1.1 Caractéristique des lampes. ....	25
Tableau 1.2 Caractéristiques des écrans d'ombrage. ....	26
Tableau 3.1 Température tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996. ....	58
Tableau 3.2 Humidité tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996. ....	59
Tableau 3.3 Table de décision pour un réglage grossier de la température. ....	63
Tableau 3.4 Matrice d'appartenance pour un réglage grossier d'humidité. ....	67
Tableau 3.5 Matrice d'appartenance pour un réglage fin de la température. ....	71
Tableau 3.6 Matrice d'appartenance pour un réglage fin d'humidité. ....	75
Tableau B-1 : Masse volumique chaleur spécifique d'un fluide ....	82
Tableau B-2: Densité de l'air (masse volumique de l'air) en fonction de température et humidité relative ....	85

## TABLE DES MATIERES

RESUME .....	
REMERCIEMENTS .....	
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX.....	
TABLE DES MATIERES .....	
INTRODUCTION .....	10
1. GENERALITE SUR LES SERRES AGRICOLES.....	12
.....	I
Introduction .....	12
.....	P
Principe de régulation du climat.....	12
.....	T
Types de construction.....	12
.....	T
Types de serres .....	13
.....	C
Choix d'emplacement de la serre.....	15
.....	L
Lumière solaire dans la serre.....	15
.....	A
Évaporation.....	16
.....	O
Ombfrage.....	17
.....	E
Éclairage .....	18
.....	C
Chauffage.....	18
.....	E
Équipement de la serre .....	21
.....	L
Le polycarbonate alvéolaire.....	27
.....	
Conclusion .....	27
2. MODELISATION D'UNE SERRE AGRICOLE .....	28
.....	I
Introduction .....	28
Description du modèle .....	28
Bilan énergétique .....	30

Température sur le sol.....	30
Méthode sur une journée de référence.....	31
Modèle énergétique de la serre.....	32
Humidité intérieure et extérieure de la serre.....	36
Le taux d'évapotranspiration des plantes.....	36
Linéarisation et découplage des systèmes.....	38
Modèle dynamique du climat d'une serre agricole.....	39
Commande du modèle de ventilation de brouillard.....	41
Commande du modèle de ventilation et de chauffage.....	42
Conclusion.....	43
3. STRATEGIE DE COMMANDE ET SIMULATION.....	44
Introduction.....	44

Schéma synoptique de la serre agricole.....	44
Correcteur PID.....	45
Régulation par le contrôleur PDF.....	46
Méthode de traitement.....	48
Régulation par le contrôleur PDOF.....	51
Simulation.....	53
Régulation de la température et de l'humidité par contrôleur PDOF.....	53
Interprétation.....	61
Régulation de la température et de l'humidité par contrôleur flou.....	61
Interprétation.....	76
Conclusion.....	77
CONCLUSION.....	78
APPENDICE.....	80
A. LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	80
B. THEORIE SUR LA CHALEUR SPECIFIQUE ET LA DENSITE DE L' AIR.....	82
C. MODELE DE COMMANDE DE LA SERRE.....	86
REFERENCES.....	91

## INTRODUCTION

De nos jours, l'homme se trouve confronté à des problèmes divers, notamment pour subvenir à ses besoins alimentaires. C'est pour cela, son problème majeur a été d'optimiser ces récoltes en alimentation avec un meilleur rendement et surtout pour un faible coût. Mais comment pouvoir réussir, dans le domaine de la culture sous abri, une production importante avec un meilleur rendement ?

La culture sous serre connaît un développement important, pour faire face à un marché de plus en plus concurrentiel et conditionné par des normes de qualité de plus en plus sévères, les systèmes de production « serre » deviennent considérablement sophistiqués et alors démesurément coûteux, c'est pourquoi les serristes qui veulent demeurer compétitifs, doivent optimiser leurs investissements par une grande maîtrise des conditions de production.

Pour parvenir à la réalisation de ces objectifs de performance souhaités, et obtenir une production optimale, il est important de suivre de près leur développement, tant pendant la croissance que pendant la maturité. Ce développement est lié à la coordination de différents facteurs climatiques tels que : l'intensité lumineuse, la ventilation, l'hygrométrie, La température, l'alimentation en eau et autres.

Cette mission délicate et pénible est confiée à l'agriculteur intéressé, qui cherche toujours comment parvenir à réduire l'influence du climat, amortir les risques d'erreurs, remplir une fonction d'optimisation et surtout éviter les catastrophes, souvent causées par le surpassement de température à l'intérieur de la serre, en cas de sirocco, ou son abaissement brutal.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés au contrôle climatique de la serre. Pour cela, nous allons développer le modèle de climatisation d'un milieu clos présenté par « Daskalov et Arvanitis, 2005 », il est de nature non linéaire et couplée. Pour commander la température et l'humidité de l'air simultanément, nous avons pris des modèles représentant les principales combinaisons entre le modèle biologique et physique de la

serre. La méthode proposée est applicable à n'importe quel dispositif du contrôle de climat.

Pour présenter au mieux et faciliter la compréhension de notre travail nous avons suivi la structure suivante :

- Dans le premier chapitre, intitulé «généralité sur les serres agricoles », nous le consacrerons aux notions générales des serres agricoles et nous présenterons les différents types de serres ainsi que leurs équipements qui doivent être installés à l'intérieur de la serre (éclairage, chauffage, refroidisseur, humidificateur, ombrage).
- Dans Le deuxième chapitre, intitulé « Modélisation d'une serre agricole », nous présenterons au premier lieu, un modèle dynamique par des équations mathématique destinées à reproduire les conditions climatiques qui nous permettra d'éviter des situations extrêmes (des niveaux de haute température ou de l'humidité,..), pour cela nous allons développer le modèle énergétique d'un milieu clos proposé par Daskalov et Arvanitis en 2005, au seconde lieu, nous présenterons la linéarisation et le découplage de notre système avec une nouvelle technique d'intelligence proposé par Sigrimis et Arvanitis en 2002.
- Dans le troisième chapitre, intitulé «Stratégie de commande et simulation» nous présenterons une étude théorique détaillée sur nos controleurs utilisés pour la régulation du climat sous serre. et nous allons réguler la température et l'humidité sous serre en exploitant les deux contrôleurs PDOF et Flou, nous utiliserons le Simulink avec un programme réalisé sous le logiciel MATLAB.
- Et nous terminerons par une conclusion et des perspectives.

## **CHAPITRE 1**

### **GENERALITE SUR LES SERRES AGRICOLES**

#### 1.1. Introduction

La plupart des plantes qui poussent en plein air dans un jardin sont rustiques, c'est-à-dire qu'elles sont adaptées au cycle des conditions météorologiques aux quelles on peut s'attendre dans la région. Quand à la serre, elle est destinée en principe à fournir un milieu plus propice pour la culture des plantes moins rustiques qui auraient du mal à se développer dans les conditions ambiantes locales normales. Les plantes cultivées sous serre ou sous tout autre abri du même genre ne sont généralement pas rustiques et leur réussite dépend uniquement de la couverture de verre ou de plastique et de la source de chaleur artificielle, faute de quoi elles mourraient. La différence essentielle entre la culture en plein air et la culture sous abri repose donc sur une maîtrise totale de l'environnement.

#### 1.2. Principe de régulation du climat

Dans la culture sous abri, le principal est de maintenir un régime de température qui répond aux besoins du type de plantes cultivées, les plantes n'exigent pas les mêmes températures optimales pour celles qu'il veut faire pousser. Ce ne doit pas être la température minimale : les plantes peuvent survivre à leur température minimale de croissance. La maîtrise du climat s'obtient en jonglant avec les sources de chaleurs naturelles ou artificielles, le matériel d'aération et les méthodes de protection contre la lumière, les pertes de chaleur et l'humidité, ce n'est pas toujours une tâche aisée les jours de vents froids ou de grand soleil. D'autres facteurs peuvent également avoir de l'importance pour certains groupes de plantes : intensité de la lumière, humidité et mouvement de l'air.

#### 1.3. Types de construction

Les serres peuvent être entièrement vitrées, ou bien avoir un ou plusieurs côtes en planches ou en briques jusqu'à la hauteur de l'étagères, il y a des avantages à l'un et à l'autre, et le choix doit dépendre de l'usage que l'on veut faire de la serre, des étagères sont

indispensables et jusqu'à leur hauteur, le mur peut parfaitement être en dur. Des demi paroi en brique, en bois ou en amiante fournissent une bonne isolation et abaissent les frais de chauffage de la serre, on peut espérer que la serre achetée dans le commerce sera stable mais, au moment du choix du modèle, il faut cependant tenir compte de l'emplacement où elle sera montée. La serre couverte de plastique, par exemple, résiste moins longtemps dans les endroits très éventés. [6]

#### 1.4. Types de serres

Les serres sont de tailles, de forme et de type très divers pour répondre à tous les besoins de jardiniers, le choix n'est pas très facile pour un débutant qui se trouve souvent désorienté devant la multiplicité des modèles. Lorsque vous envisagez l'achat d'une serre, évaluez avec précision l'espace utile qui vous est nécessaire, c'est-à-dire calcul simple de la surface disponible au sol et sur les gradins pour savoir combien de plantes la serre pourra recevoir, multiplier tout simplement la longueur de la serre par la largeur en tenant compte de l'espace occupé par les aillées, les portes et le matériel d'équipement, tels les appareils de chauffage et les réservoirs d'eau, En règle générale, plus la serre est grande plus son prix de revient à l'unité de surface est faible. [6]

##### 1.4.1. Serre tunnel

C'est une serre à couverture simple paroi (film polyéthylène ondulé).

- Longueur : 6m- 7.5m, 9m, 10.5m, 12m.
- Hauteur : 2.4m.
- Fixation par piquet hélice à visser dans la terre.
- Couverture de toit : PVC



Figure 1.1 : Serre tunnel. [34]

### 1.4.2. Serres isolées

Dans ce type de serre on peut avoir des murs droits ou inclinés vers l'intérieur. Quand à leur toit, il peut être simplement à deux versants ou bien en croup avec un arêtier ou encore curvilinéaire à double croupe.

### 1.4.3. Mini Serre adossée

C'est un modèle beaucoup plus étroite, elle est intéressante pour un petit jardin ou dans le cas où l'on ne dispose que d'une surface de mure réduite.

Ces serres d'entrées de gamme sont destinées aux jardiniers possédant une surface disponible réduite ou pour celui que la pratique du jardinage est occasionnel.



Figure 1.2 : Mini serre adossée. [34]

### 1.4.4. Serres mobiles

Les exploitants commerciaux utilisent des serres mobiles qui peuvent être déplacées au dessus des cultures sur un système de rails, cela facilite leur programme de rotation.

### 1.4.5. Serres châssis

Un châssis de bonne taille mesure environ  $1,2 \times 1,80 \text{ m}^2$ . on peut se procurer des châssis doubles et multiples de ce modèles de bases. Ces châssis légers en métal ou en plastique sont facile à déplacer dans un jardin, on peut disposer des châssis le long des côtés de serre à demi parois de planches pour qu'ils bénéficient du surplus de chaleur provenant de la serre. La forme la plus simple de châssis est un panneau léger de verre ou de plastique que l'on place au dessus d'une fosse peu profonde.



Figure 1.3 : Serre châssis. [34]

#### 1.4.6. Serre en cloche

La serre la plus récente est la cloche tunnel en feuilles de plastique souple que l'on étire sur une série d'arceaux en fil métallique et que l'on maintient en place le long de la rangée grâce à d'autres arceaux métalliques, les extrémités y sont fermement ancrées lorsqu'on les enfouit dans le sol, l'aération est assurée en relevant le plastique du côté opposé au vent. [6]

#### 1.5. Choix d'emplacement de la serre

Un bon éclairage et une protection contre les vents violents sont les deux facteurs fondamentaux à prendre en considération, le premier est particulièrement important si l'on envisage de cultiver des plantes les mois d'hiver et sans abri quelconque contre les bourrasques, les pertes de chaleur dépasseront les limites admises, notamment durant les périodes de froid.

Pour profiter au maximum de la lumière du bas soleil d'hiver, la serre doit être montée avec son grand axe dans la direction est-ouest, ou le plus près possible de cette orientation, cette position réduit au minimum l'ombre portée par les poutres du toit et les montants des vitres, elle permet aussi aux rayons du soleil de pénétrer dans la serre sous l'angle le plus efficace. [30]

#### 1.6. Lumière solaire dans la serre

La lumière et la chaleur du soleil se propagent jusqu'à la terre sous forme de radiations de courte de longueur d'onde qui traversent aisément une feuille de plastique ou

une plaque de verre, ces radiations échauffent tous ce qu'elles touchent, sol, tablettes, terre, pots, et même les plantes elles-mêmes, qui réfléchissent une partie de cette chaleur sous forme des rayons de grande longueur d'onde, c'est parce que le verre ne permet pas le passage de ces rayons de grande longueur d'onde qu'il se produit une accumulation de chaleur à l'intérieur de la serre, dès que la serre est plongée dans l'obscurité ou que le soleil se couche, la chaleur se dissipe par écoulement d'air à travers des craquelures et sous forme de radiations de grande longueur d'onde à travers les murs en dur et le bâti.

En pénétrant dans une serre en feuilles de polyéthylène, les radiations se diffusent et les rayons de grande longueur d'onde qui se forment ne sont pas piégés.

L'échauffement de la serre donne naissance à des courants de convection et l'air chaud entre en un mouvement cyclique qui varie légèrement avec la forme et la taille de la serre ainsi qu'avec l'ampleur de l'aération, en théorie les courants de convections chauffent tout l'espace intérieur mais, en fait, il subsiste généralement de petites poches d'air froid et d'air chaud.

### 1.7.Aération

L'effet de serre qui provoque une rapide accumulation de chaleur à l'intérieur de la serre quand elle est au soleil, il est indispensable d'avoir un système d'aération efficace pour réguler la température, l'aération est également nécessaire pour fournir un apport d'air frais et lutter contre l'humidité. En effet, l'air confiné offre des conditions idéales pour la propagation des maladies et des parasites. L'aération doit être considérée comme un facteur contribuant au maintien dans la serre d'un milieu équilibré et son étude ne peut être dissociée de celle du chauffage, de l'ombrage et de la régulation de l'humidité.

Pour avoir une aération complète et correcte, la surface totale de aérateurs du faite doit être égale au moins au sixième de la superficie au sol, et même plus si possible. pour une petite serre, il suffit généralement d'aérateurs alternés de chaque côté de l'arrête faîtière, ou au minimum deux tous les deux mètre. Dans le cas des grandes serres ou de celles destinées à la culture des plantes alpines, l'idéal est d'installer une série continue d'aérateurs le long de chaque côté.

Tous les aérateurs doivent être aisément réglables depuis la position fermée jusqu'à la position grande ouverte ce qui équivaut à une possibilité d'ouverture d'environ 55 degrés.

- Mécanisme d'ouverture des aérateurs

Dans les petites serres, les aérateurs sont manœuvrés à la main, ils sont ouverts et bloqués par le même système. Dans les plus grandes serres, en particulier celles dont les aérateurs sont trop hautes pour être accessibles, on a recours à toute sorte de méthodes d'ouvertures à l'aide de crémaillères, de manivelles et d'engrenages. Ce facteur, ajouté à la fréquente absence d'un jardinier au cours de la journée, a poussé à inventer des mécanismes automatiques. Ce dernier est un moteur électrique couplé à des engrenages de remontée et commandé par un interrupteur actionné par un thermostat, un système plus récent, qui connaît maintenant un succès certain pour les petites serres, est déclenché par un composé sensible à la chaleur, ce composé est enfermé dans un cylindre métallique robuste dans l'une des extrémités est fermée par un plongeur, l'autre étant ouverte. Ce composé se dilate à la chaleur et repousse le plongeur, dans la pression relativement faible est amplifiée par un système de leviers qui ouvrent l'aérateur. La fermeture se fait progressivement dès que le composé commence à refroidir. La plus part de ces dispositifs peuvent être réglé de façon à déclencher l'ouverture à diverses températures, des mécanismes plus sophistiqués commandent les aérateurs en fonction de toute une série de conditions climatiques. Des anémomètres mettent en marche des moteurs pour fermer les aérateurs et éviter ainsi les courants d'air. Un pluviomètre peut être branché aux commandes des aérateurs pour ferme la serre en cas de pluie, bien qu'on puisse obtenir le même résultat avec des thermostats très simples qui répondent à un épaissement du manteau nuageux et à la chute de température qui en résulte. Des commandes actionnées par la lumière solaire sont encore un autre perfectionnement. [6]

### 1.8. Ombrage

Pour ombrager une serre, il y a deux moyens fondamentaux : peindre les vitres ou y pulvériser un liquide, ou bien utiliser des stores. On avait autrefois l'habitude de blanchir les vitres à la chaux ou d'y appliquer une peinture émulsionnée très diluée. L'inconvénient majeur de l'emploi des liquides pour ombrager est que, pendant les inévitables périodes de temps gris et frais de l'été, les plantes souffrent d'un manque de lumière et de chaleur, juste au moment où elles en auraient le plus besoin. C'est pourquoi les stores sont préférables car plus efficaces. Les stores à rouleau se fixent indifféremment à l'extérieur ou à l'intérieur de la serre, les stores à l'extérieur sont les plus efficaces car ils évitent

l'accumulation de la chaleur. Les stores montés à l'intérieur des vitres empêchent la lumière d'atteindre les plantes mais la chaleur traverse le vitre et chauffe la serre comme elle le ferait sans store. Il vaut donc mieux, en général, monter les stores à l'extérieur, mais en tenant compte des intempéries, surtout des vents violents. On peut éventuellement les dérouler en hiver pour obtenir une certaine protection contre les gelées.

Les meilleurs stores sont ceux à lattes de bois ou de plastique car ils sont solides et s'enroulent et se déroulent facilement. Ils laissent passer un peu de lumière mais les plantes individuelles ne sont pas lésées car l'angle du soleil se modifier lentement au cours de la journée. Les stores en plastique blanc diffusant et les stores vénitiens donnent aussi des bons résultats. Il est préférable, surtout pour les propriétaires de serre qui sont absents de chez eux toute la journée, que les stores à rouleau soient automatisés, le mécanisme de déroulement étant relié à un œil électronique ou à un thermostat.

### 1.9. Eclairage

On peut employer des installations d'éclairage pour accélérer la croissance des plantes et pour modifier leur vitesse de développement dans le but d'obtenir des effets spéciaux. De nombreuses plantes sont très sensibles à la longueur du jour, la période pour laquelle la lumière est assez forte pour qu'elles se développent. Dans les régions septentrionales et dans celles à forte pollution atmosphérique, ce niveau est souvent loin d'être atteint en hiver.

L'éclairage se fait à l'aide d'un tube ou à ampoule, comportant un appareillage résistant et étanche à l'humidité, est relativement bon marché et facile à installer dès que l'on dispose d'une source de courant. Un éclairage accroîtra le profit qu'on peut tirer d'une serre en hiver en permettant au jardinier absent de chez lui pendant la journée de s'occuper de ces plantes à l'aise.

### 1.10. Chauffage

La première question à se proposer quand on envisage d'installer un chauffage est celle du niveau de chaleur nécessaire. Deux facteurs doivent être pris en considération. Ce sont les conditions météorologiques qui prévalent dans la localité et les besoins des plantes à cultiver. Une fois connus la température minimale nécessaire dans la serre, le calcul de l'élévation de température qu'il vous faut obtenir n'est pas difficile à faire. C'est le nombre

de degrés dont il faut élever la température au dessus du minimum susceptible d'être rencontré dans la localité.

La chaleur se dissipant rapidement à travers les vitres, il peut aisément se créer des poches de froid si le système de chauffage n'est pas bien conçu. Un simple radiateur placé au centre de la serre ne réchauffera pas nécessairement tout l'espace intérieur, c'est pour ça les tuyauteries chauffantes connaissent un tel succès, pour vérifier s'il existe des zones de froid, placez plusieurs thermomètres à maximum et à minimum échelonnés tout autour de la serre et laissez les-y toute la nuit, ou bien si vous n'avez qu'un seul thermomètre, déplacez-le en différents points les nuits où la température de l'air est la même ou très voisine. Avant de calculer vos besoins en chaleur, voyez ce que vous pouvez faire pour améliorer l'isolation de la serre. Des doubles vitres sont le moyen le plus efficace pour diminuer les pertes de chaleur. Un est coûteuse et peut gêner la transmission de la lumière. Mais c'est une solution de plus en plus à envisager avec les progrès réalisés dans la conception des nouveaux modèles et l'augmentation continue du prix de combustibles. A sa place, on peut temporairement doubler les vitres par des feuilles de plastique ou poser des panneaux isolant sur les parties basses des côtés de la serre. Les courants d'air doivent être supprimés partout où cela est possible, non seulement parce qu'ils accroissent la déperdition de chaleur, mais aussi parce qu'ils gênent le fonctionnement des appareils de chauffages. [6]

#### 1.10.1. Chauffage par tuyaux d'eau chaude chauffée par un combustible solide

Chauffer de l'eau en faisant brûler un combustible solide est un moyen économique de chauffer une serre. Beaucoup sont dotés d'assez bons dispositifs thermostatiques mais ils ne se règlent pas avec autant de précision que les appareils à gaz et les radiateurs électriques. L'eau, chauffée dans une chaudière, circule à travers tous un système tuyauteries doivent s'élever en pente douce à partir de la chaudière.

#### 1.10.2. Chauffage par un tuyau d'eau chaude chauffée au fuel

Les poêles à combustible solide peuvent être adaptés pour brûler du fuel ou bien l'on peut installer un appareil de construction spéciale. Les appareils à combustible liquide peuvent être équipés de contrôles thermostatiques qui maintiennent automatiquement une température constante sans une surveillance constante. Les grosses installations

spécialement conçues pour brûler du fuel sont extrêmement efficaces et entièrement automatiques.

#### 1.10.3. Chauffage par un tuyau chaud chauffé au gaz

Les chaudières à gaz sont faciles à faire fonctionner et peuvent être totalement automatiques si elles sont dotées de thermostat. Prenez soin d'installer la chaudière à un endroit où le gaz dégagés ne se ré pondra pas dans la serre. Assurez-vous que la conduite d'évacuation de la chaudière est assez haute pour entraîner les gaz loin de la serre. Tous les types de chaudières doivent être régulièrement entretenus si l'on veut éviter d'avoir des problèmes avec les fumées et les déchets de combustibles.

#### 1.10.4. Chauffage électrique

Le chauffage électrique est le plus efficace et celui qui donne le meilleur rendement, il est facile à régler et à nettoyer et c'est celui qui présente le moins de danger pour les plantes car il ne dégage pas de fumées. Il doit être installé par un électricien car la combinaison de l'électricité et de la vapeur d'eau risque d'être fatale. Il existe de nombreux types d'appareils de chauffage électrique spécialement mis au point pour les serres. Les radiateurs tubulaires sont capables d'assurer une répartition de la chaleur aussi uniforme que les tuyauteries d'eau chaude. Montez-les le long d'un mur latéral en une simple rangée ou groupez-les en certains points autour de la serre pour donner plus de chaleur aux zones les plus froides. Il y a aussi des radiateurs soufflant compacts. Equipés d'un ventilateur, qui sont faciles à déplacer et répartitionneront la chaleur dans tout le volume de la serre. Les modèles les plus perfectionnés comportent des thermostats séparés pour le ventilateur et la chaleur, en ne fournissant de la chaleur que lorsque c'est nécessaire. L'avantage de ce système est qu'il permet d'obtenir une circulation intermittente de l'air avec peu de déperdition de chaleur. Les radiateurs à convection sont un autre type efficace de chauffage électrique. Dans une petite chambre percée de trous en haut et en bas, des fils électriques chauffent de l'air. L'air chaud s'élève et s'écoule par la partie supérieure pendant que de l'air froid est aspiré par le bas. Des courants de convection assurent ainsi régulièrement le brassage de l'air tout autour de la serre

## 1.11. Equipement de la serre

### 1.11.1 Système de ventilation d'air

Le principe consiste à ventiler la serre en actionnant l'extracteur d'air, ce procédé ne permet en aucun cas de baisser la température en dessous de la température extérieure.



Figure 1.4 : Système de refroidissement. [34]

### 1.11.2. Humidificateur

Le principe de fonctionnement consiste à aspirer l'air sec extérieur à travers la grille d'admission arrière, L'air passe ensuite à travers un filtre à mèche extrêmement mouillé qui en retient les minéraux et les dépôts. L'air humide produit est expulsé dans l'espace par la grille supérieure.

L'évaporation de l'eau permet à la fois de charger l'air en humidité et de baisser sa température.

A: Poignée du réservoir.

B: Réservoir du l'humidificateur.

C: Boîtier principale.

D: Humidisant touche.

E: voyant lumineux de réglage de l'humidité

F: Réglage de la vitesse.

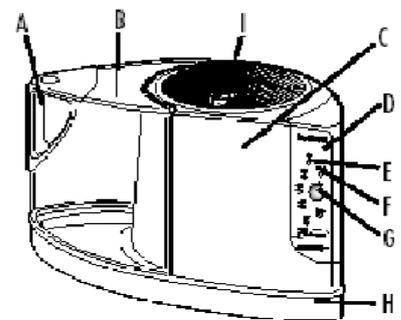


Figure 1.5 : Humidificateur à buée froide. [34]

G: Bouton MODE/OFF.

H: Base de l'humidificateur.

I : Indicateur filter check.

### 1.11.3. Système de chauffage [34]

Nous avons sélectionné 4 appareils mis au point spécialement pour nos serres :

- Système parasene 3 Kw : est un appareil électrique automatique soufflant fonctionnant sur une alimentation classique 220 V (monophasé). Compact, il est idéal pour la mise hors gel des petits volumes.
  - Equipé d'un thermostat réglable.
  - Deux puissances de chauffage.
  - Ventilateur pour répartition de l'air chaud dans tout la serre.
  - Conçu spécialement pour la serre.



Figure 1.6 : Système du chauffage (Parasene 3 Kw).

- Système phoenix : est un chauffage électrique (230 V) permettant un meilleur contrôle de la température et un brassage plus efficace de l'air ambiant de la serre. Il est adapté pour des serres possédantes une longueur relativement importante (+ 4,50 m), et pour

une utilisation régulière et "pointue". Avec un seul appareil vous disposez de 3 puissances de chauffage : 1Kw, 1,8 Kw ou 2,8 Kw.



Figure 1.7 : Système du chauffage (Phoenix 1, 1,8 ou 2,8 Kw).

- Système thermibox : fonctionne sur bouteille de gaz propane et permet de mettre hors gel (+ 5° C) une serre jusqu'à 44 m<sup>3</sup> (exemple serre Euro Maxi 3,09 x 6,04 m / hauteur 2,36 m pour une température extérieure moins de - 7° C Calculs estimatifs, car dépendant de l'exposition de la serre Aux intempéries). Pour un fonctionnement au régime maximum, l'autonomie avec une bouteille de 13 Kg est estimée à +42 heures. Il est équipé de sécurités pour une utilisation sans surveillance.

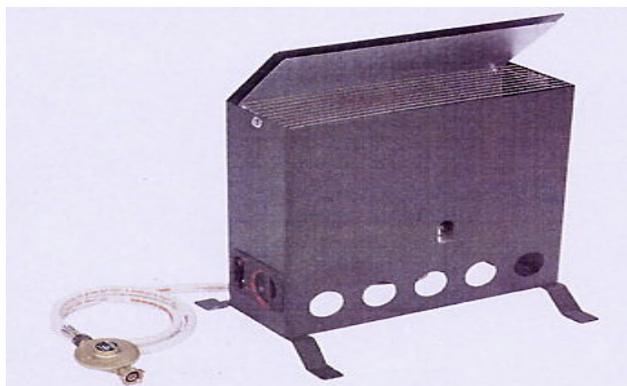


Figure 1.8 : Système du chauffage (Thermibox) . [34]

- Système 9000TI : est un appareil électrique automatique à air pulsé fonctionnant sur une alimentation triphasée, sa puissance de 9000 W permet de mettre hors gel ou de chauffer des espaces plus grands.



Figure 1.9 : Système du chauffage (Système 9000TI) [34]

#### 1.11.4. Système d'éclairage

Les lampes de croissance apporteront le complément de lumière nécessaire au développement des plantes.

- Dans la serre, lorsque le temps est nuageux ou la nuit. En intérieur ou dans les locaux recevant peu de lumière naturelle.



Figure 1.10 : Système d'éclairage. [34]

La relation entre éclairage optimal et un rendement optimal a été clairement établie. Avec l'éclairage de croissance (artificiel) vous tirerez le maximum de vos cultures, non seulement au niveau de la production mais aussi au niveau de la qualité.

L'ensemble d'éclairage PL 94 peut être équipé d'une ampoule Philips de puissance plus 400 W ou 600 W. [24]

Lampes Caractéristiques	PL94 400 Watt	PL94 600 Watt
Consommation de courant (230 v)	2,3 A.	3,3 A
Tension/fréquence	230V / 50 Hz.	230V / 50 Hz.
Puissance (moyenne) utilisé	445 Watt	645 Watt
Tolérance	± 5%	± 5%
Facteur de puissance (cos Ø)	> 0,85 I	> 0,85 I
Poids	± 9,5 kg	± 11,5 kg

Tableau 1.1 : Caractéristiques des lampes.

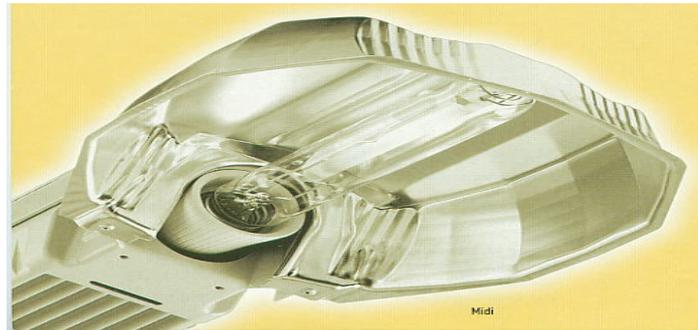


Figure 1.11 : Système d'éclairage (Lampe PL94400)

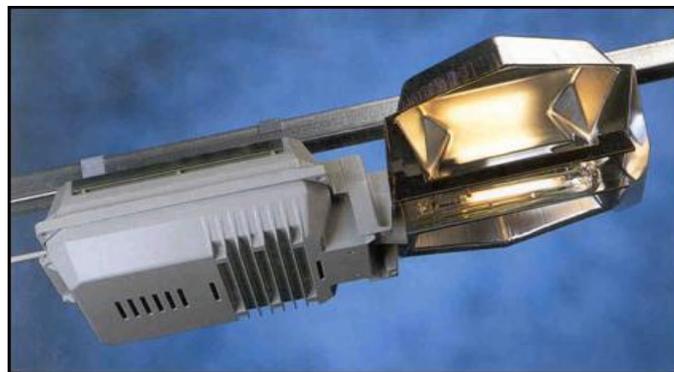


Figure 1.12 : Système d'éclairage (Lampe PL 94 600)

### 1.11.5. Écran d'ombrage et thermique à tirage manuel

Utilisé par les professionnels pour limiter efficacement la température à l'intérieur des serres, notre écran d'ombrage à tirage manuel protégera nos fleurs contre le rayonnement solaire et plantations dès le printemps. L'hiver, en le tirant pour la nuit, il devient un écran thermique en constituant un faux plafond dans notre serre (réduction du volume à chauffer), permettant ainsi des économies de chauffage. La toile utilisée est 100% acrylique pour plus de solidité.

Certains modèles possèdent même des bandes aluminium qui reflèteront les rayons du soleil. La toile peut être également être utilisée sur les côtés. [34]



Figure 1.13 : Ecran d'ombrage à tirage manuel.

- Ses caractéristiques :

Référence	Composition	Caractéristiques
Isotex	100 % Acrylique Blanche sans bande aluminium	50 % d'ombrage 0% d'économie d'énergie
HS 885 S	100 % Acrylique 2 bandes aluminium	70 % d'ombrage 60 % d'économie d'énergie

Tableau 1.2 : Caractéristiques des écrans d'ombrages.

#### 1.11.6. Système d'aération (Compas pour automatique) [34]

Le compas grâce à sa cire spéciale, ouvre et ferme automatiquement les lucarnes en fonction de la température intérieure, et ceci sans électricité.



Figure 1.14 : Système d'aération automatique (Compas).

#### 1.12. Le polycarbonate alvéolaire

Les plaques polycarbonate alvéolaire constituées de 2 à 5 parois selon l'épaisseur, Plus la feuille sera épaisse, plus l'isolation thermique sera importante. Ces plaques sont disponibles en épaisseur 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 16 mm, 20 mm et 32 mm.

- Ses caractéristiques
  - Très haute résistance aux chocs permettant de minimiser le risque de casse dus aux chutes de grêle, de branches, de ballons, de personnes...
  - Sécurisant en évitant les risques de coupure en cas d'impact.
  - Isolation thermique supérieure au verre grâce aux espaces d'air entre les parois.
  - Facile et rapide à poser grâce à son faible poids.
  - Facile à découper pour une adaptation sur mesure.
  - Très léger, il n'alourdit pas votre structure.

#### 1.13. Conclusion

Après avoir défini les principaux ainsi que les différents types de serre existant sur le marché nous allons développer dans le chapitre qui suit les éléments physiques intervenant dans une serre agricole en donnant un aperçu sur les types de commande que nous allons appliquer dans le chapitre qui suivent.

## **CHAPITRE 2**

### **MODELISATION D'UNE SERRE AGRICOLE**

#### 2.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation de notre système réel pour l'obtention d'un modèle dynamique, Puis nous allons détailler, une nouvelle approche de la linéarisation et le découplage des systèmes pour le contrôle de l'environnement des serres agricoles (Calcul de nouvelles commandes qui rendent notre système linéaire et découplé).

Dans ce qui suit, nous allons développer le modèle énergétique de climatisation à l'intérieur d'un milieu clos proposé par Daskalov et Arvanitis [31], et le modèle présenté par PI Daskalov [11], S. Pederen [25], B.P Ager And J.A. Tickner [5] et C. Kittas [4]. Et ceci en se basant sur les bilans des énergies de la matière et des modèles physiques, tout en sachant que la serre est soumise à trois perturbations essentielles, qui sont le rayonnement solaire, la température extérieure et l'humidité extérieure.

#### 2.2. Description du modèle [8] [9]

La serre constitue un système biologique et énergétique très complexe dans laquelle la plupart des modes de transferts thermiques sont mis en jeu :

- ✓ Conduction à travers du sol.
- ✓ Convection à la surface de la couverture, des plantes, du sol et des échangeurs.
- ✓ Evaporation au niveau du sol et des plantes.
- ✓ Conductions sur la couverture.
- ✓ Renouvellement de l'air dû à la perméabilité de la serre ou à une ventilation mécanique.
- ✓ Rapports solaires à travers des matériaux de couverture.

- ✓ Les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre les différents éléments.

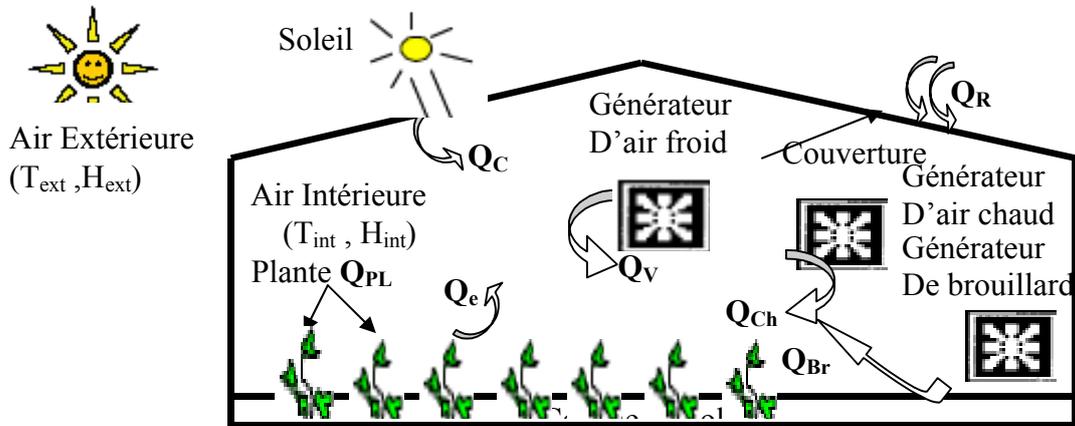


Figure 2.1 : Description énergétique de la serre.

- ✓ Le modèle est constitué de six éléments suivants : La couverture (C), la plante (PL), l'air intérieur (Ai), le sol (S), l'échangeur du système de brouillard (Br), l'échangeur du système de chauffage (Ch), avec l'air intérieur est caractérisé par deux variables d'état supposées uniformes : sa température  $T_{int}$ , et son humidité  $H_{int}$ .
- ✓ La géométrie de la serre de la figure 2.2 est définie par sa longueur  $L$ , sa largeur  $l$ , son volume  $V$ , et la hauteur  $h$ .

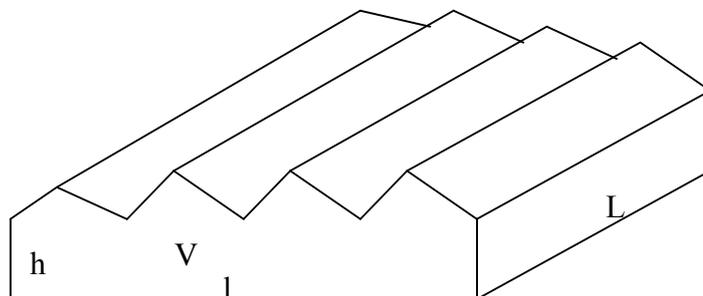


Figure 2.2 : Structure géométrique de la serre.

### 2.3. Bilan énergétique

#### 2.3.1 Bilan de la couverture extérieure [1]

Ce type de bilan dépend de transfert enthalpie résultant de la condensation de la vapeur d'eau de l'air intérieur sur la face interne de la couverture et la condensation qui est supposée et s'évacuée par gravité du long de la couverture.

#### 2.3.2. Bilan sur l'air intérieur [12]

Deux bilans interdépendants sont formulés, puisque l'air intérieur est défini par deux variables d'états par sa température et son humidité absolue.

- ✓ Bilan enthalpie sur la vapeur d'eau :

Ce bilan fait intervenir l'évapotranspiration des plantes et l'évaporation du sol, ainsi que les condensations éventuelles sur la paroi de la couverture.

- ✓ Bilan enthalpie sur l'air sec :

Ce type de bilan dépend de la capacité calorifique de l'air intérieur et la source qui correspond au système de chauffage.

#### 2.3.3. Bilan sur le sol [1]

Le sol est discrétisé en P couche (on suppose que la température de chaque couche est uniforme), ce type de bilan dépend des flux conductibles entre les couches et aux variations d'énergie accumulée par chaque couche.

La formulation des bilans d'énergie détermine un système d'équations différentielles non linéaires où chaque équation correspond à la formulation du bilan d'énergie d'un élément, les inconnues de ce système sont les variables d'état de chaque élément de température (T), et d'humidité (H).

### 2.4. Température du sol [1] [15]

L'énergie thermique du sol joue un rôle essentiel sur le climat intérieur de la serre, pendant la nuit, le sol restitue une partie de la chaleur accumulée pendant la journée sous l'effet du chauffage et des apports solaires.

Nous sommes basés sur l'estimation de la température des couches de sol par l'utilisation de développement en série de fourier de la solution analytique de l'équation de propagation de la chaleur dans le sol, cette technique permet de stabiliser très rapidement le cycle de la journée de référence.

### 2.5. Méthode sur une journée de référence [1]

La méthode sur une journée de référence, où les conditions climatiques coïncident à 0h et 24h, on peut représenter la loi d'évolution périodique de température de la surface du sol dans la serre par une série de fourier suivante :

$$T_s(0,t) = \langle T_s(0) \rangle + \sum_{n=1}^{n=N} [a_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)] \quad (2.1)$$

Où :

t : le temps.

T : période des oscillations (24x3600) (s).

W : pulsation des oscillations ( $2 \cdot \frac{\pi}{T}$ ) (s<sup>-1</sup>).

$\langle T_s(0) \rangle$  : La température moyenne de la surface du sol.

a<sub>n</sub>, b<sub>n</sub> : coefficients d'ordre n de la décomposition en série de fourier.

Lorsque l'évolution de la température du sol démarre à partir d'une condition initiale T<sub>s</sub>(x, 0), le profil de la température dans le sol de la serre, T<sub>s</sub>(x, t), est la solution de l'équation de propagation de la chaleur par conduction dans un milieu semi infini en régime variable.

$$\frac{dT_s(x,t)}{dt} = a \cdot \frac{d^2T_s(x,t)}{dx^2} \quad (2.2)$$

Où :

x : La profondeur (m).

t : temps (s).

a : diffusivité du sol (m<sup>2</sup>/s).

On peut développer la solution analytique de ce profil sous la forme d'une somme de deux termes.

$$T_s(x, t) = T_{s1}(x, t) + T_{s2}(x, t) \quad (2.3)$$

Le premier terme,  $T_{S1}(x, t)$  est périodique de période égale 24h, son amplitude décroît exponentiellement avec la profondeur  $x$ .

$$T_{S1}(x, t) = \langle T_S(0) \rangle + \sum_{n=1}^{n=N} [a_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t - x \cdot \alpha \cdot n^{0.5}) + b_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t - x \cdot \alpha \cdot n^{0.5})] \cdot e^{-x \cdot \alpha \cdot n^{0.5}} \quad (2.4)$$

avec :  $\alpha = (\omega / (2 \cdot a))^{0.5} (m^{-1})$

Le deuxième terme,  $T_{S2}(x, t)$ , est un terme transitoire qui tend à s'annuler asymptotiquement

$$T_{S2}(x, t) = (T_S(x, 0) - \langle T_S(0) \rangle) \cdot \left[ \frac{x}{(\pi \cdot a \cdot t)^{0.5}} \right] \quad (2.5)$$

En régime établi, la température du sol ne dépend plus que du période  $T_{S1}(x, t)$ , la température moyenne en tout point du sol est égale à la température moyenne du sol en surface  $\langle T_S(0) \rangle$ , et à partir d'une certaine profondeur, où le terme d'amortissement de  $T_{S1}(x, t)$  annule le terme oscillant, la température du sol reste uniforme, égale à la température moyenne du sol à la surface. [12]

Le premier terme,  $T_{S1}(x, t)$ , permet ainsi à déterminer la profondeur  $x$ , à partir de laquelle l'amplitude des variables de la température de surface est amortie au moins  $n$  fois

$$x = \frac{\text{Ln}(n)}{\alpha} \quad (\text{m}) \quad (2.6)$$

Afin d'accélérer cette convergence, nous avons déterminé la température initiale des couches du sol à partir de l'expression analytique du régime périodique établi  $T_{S1}(x, t)$ .

## 2.6. Modèle énergétique de la serre agricole

Depuis près de trente ans, la littérature spécialisée fait l'état d'un grand nombre de travaux de modélisation destinés à appréhender les phénomènes énergétiques qui régissent le climat intérieur des serres agricoles. [15][21]

L'évolution de ces modèles a été rapide, poussée à la fois par le développement de nouveaux moyens informatiques et par une conjoncture où la compréhension et la maîtrise des phénomènes énergétiques devenaient fondamentales.

Notre modèle c'est la connaissance dynamique monodimensionnelle, qui s'articule autour de la formulation des bilans d'énergie des différents composants de la serre (Air intérieur, plantes, sol, échangeur de chaleur). Ce dernier est couplé et fortement non

linéaire en ce qui concerne la température (Chauffage/Refroidissement) et l'humidité. Ces équations sont définies comme suit : [11]

$$\rho C_p V_T \frac{dT_{int}}{dt} = Q_{PL} + Q_{Ch} + Q_R - Q_V - Q_C - Q_e - Q_{Br} \quad (2.7)$$

$$\rho V_H \frac{dH_{int}}{dt} = H_{PL} + H_{Br} - H_{air,int} + H_{air,ext} + H_e \quad (2.8)$$

$\rho$  : La densité de l'air [ $\text{kg.m}^{-3}$ ].

$C_p$  : La chaleur spécifique de l'air [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ].

$Q_{PL}$  : La chaleur produite par l'évapotranspiration des plantes [kw].

$Q_{Ch}$  : La chaleur du système de chauffage [kw].

$Q_C, Q_e, Q_{Br}, Q_V$  : La chaleur, perdue par la couverture, vaporisation de l'eau, le système du brouillard et par le système de ventilation [kw].

$Q_R$  : La chaleur produite par le soleil [kw].

$T_{int}$  : La température de l'air intérieur de la serre [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$H_{int}$  : L'humidité de l'air intérieur de la serre [%].

$H_{PL}$  : Le taux produit par l'évapotranspiration des plantes [ $\text{kg.h}^{-1}$ ].

$H_{Br}$  : Le taux d'évaporation de l'eau pour le système du brouillard [ $\text{kg.h}^{-1}$ ].

$H_{air,int}, H_{air,ext}, H_e$  : Le taux de transfert d'humidité à partir de l'air extérieur entrant de la serre, Taux de transfert d'humidité de l'air intérieur sortant de la serre et le taux d'évapotranspiration de l'eau respectivement [ $\text{kg.h}^{-1}$ ].

### Remarque [16] [10]

Les volumes  $V_T$  et  $V_H$  qui sont utilisés en équilibre sont le mélange de volume actif AMV de La température et le volume efficace pour l'humidité respectivement.

En général, AMV de l'espace aéré peut être petit que de 60-70% du volume géométrique. Ceci, naturellement signifie que la température de l'air et de l'humidité intérieure peut être susceptibles d'être uniformes dans tout l'espace aéré. Cependant, dans un modèle à un seul état (ex : Température), la capacité de chaleur efficace doit être prise plus grande que celle correspondante à l'AMV. De même le volume efficace pour l'humidité (EVH) peut être plus petit ou plus grand que la géométrique, selon le degré d'effets de mélange, tels que les pertes d'air et de l'humidité (c-à-d les pertes d'air par des fuites sont également couplées à des pertes d'humidité portées avec l'air, et la condensation sur les surfaces froides évier de l'humidité).

### 2.6.1. La chaleur produite par des plantes

La chaleur produite par les plante  $Q_{PL}$  et le vapeur d'eau sont des fonctions non linéaires et dépendent de la température de l'air intérieur  $T_{int}$ , le nombre de plante  $N$  sont données par : [31], [14]

$$Q_{PL} = f(T_{int}, N_{PL})$$

$$H_{PL} = f(T_{int}, N_{PL}) \quad (2.9)$$

Avec :

$$Q_{PL} = 0.096N_{PL}[0.8 - 1.8510^{-7}(T_{int} - 10)^4] \quad (2.10)$$

$$H_{PL} = 0.001N_{PL}[0.26T_{int} - 6.46T_{int} + 81.6] \quad (2.11)$$

Remarque: A l'équilibre thermique  $Q_{PL}$  négligeables devant le générateur de l'air chaud et dans une serre de grande taille [31]

### 2.6.2. La chaleur perdue par l'évaporation de l'eau

Les pertes de la chaleur dues à l'évaporation de l'eau sont calculées en utilisant les équations suivantes :

$$Q_e = \lambda.H_e$$

$$H_e = f_e(T_{int}, H_{int}) = 1.2K_e A_e [3.9.10^{-3} e^{\frac{T_{int}}{15.2}} - H_{int}] \quad (2.12)$$

$\lambda$ : La chaleur latente d'évaporation [kj.kg<sup>-1</sup>].

$K_e$ : Le coefficient d'évaporation qui est en fonction de la vitesse du vent  $v_{air}$  [kg.h<sup>-1</sup>].

$A_e$ : La surface évaporée (m<sup>2</sup>).

$$K_e = 0.223 + 1.149.g_e(v_{air}) \quad (2.13)$$

Puisque la vitesse du vent à l'intérieur de la serre est négligeable et dans le cas où on a une serre de moyenne ou grande taille, donc on peut considérer la chaleur de vaporisation d'eau pour les plantes est négligeable. [15]

### 2.6.3 La chaleur perdue par l'humidificateur [31] [22]

Cette chaleur est définit comme suit :

$$Q_{Br} = \lambda.H_{Br} \quad (2.14)$$

- ✓ Si on a une serre de surface inférieure à 100m<sup>2</sup> (petite serre) on peut considéré Q<sub>e</sub> et H<sub>e</sub> de l'équation (2.12) comme des perturbations externe de notre modèle. [10]
- ✓ Les pertes de chaleur dues au système de brouillard Q<sub>Br</sub> sont liées à la capacité de l'eau du système de brouillard H<sub>Br</sub> (taux de vaporisation de l'eau par le système du brouillard).

#### 2.6.4 La chaleur perdue par le système de ventilation [31]

Les pertes de la chaleur du système de ventilation Q<sub>V</sub> sont une fonction linéaire entre la différence de la température intérieur et extérieur comme indique l'équation (2.15).

$$Q_V = f_v(T_{int}, T_{ext}, V_{vt}) \approx \rho \cdot C_p \cdot V_{vt} (T_{int} - T_{ext}) \quad (2.15)$$

V<sub>vt</sub> : Taux de ventilation totale.

Le taux de ventilation totale V<sub>vt</sub> dans une serre peut être représenté comme une somme de ventilation mesurée (commandée) V<sub>v,m</sub> et le taux d'aération provenant par des petites fissures dans la serre V<sub>v,f</sub> comme indique l'équation(2.16).

$$V_{vt} = V_{v,m} + V_{v,f} \quad (2.16)$$

En effet, le taux de ventilation V<sub>v,f</sub> dépend de la vitesse du vent.

Par conséquent, l'équation (2.16) prend la forme suivante :

$$V_{vt} = f_{vt}(V_{v,m}, v_{air}) \quad (2.17)$$

#### 2.6.5 La chaleur transféré par la couverture [31]

Les pertes de la chaleur conductrice de couverture sont une fonction linéaire entre la différence de température intérieure et extérieure de la serre, et peut être exprimée comme suit :

$$Q_C = f_C(T_{int}, T_{ext}) \approx UA(T_{int} - T_{ext}) \quad (2.18)$$

UA : C'est le coefficient de transfert chaleur de la couverture de la serre [kw.k<sup>-1</sup>].

#### 2.6.6. La chaleur produite par le soleil [23] [13]

La chaleur produite par le soleil à l'intérieur de la serre est exprimée comme suit :

$$Q_{Si} = a \cdot A_f \cdot S_i = R. \quad (2.19)$$

Où :

$A_f$ : la surface au sol ( $m^2$ ).

$a$  : l'efficacité du condensation de la chaleur solaire=0.28.

$S_i$  : le rayonnement solaire incident ( $W/m^2$ ).

$R$  : la chaleur produite par le soleil (W).

## 2.7. Humidité intérieure et extérieure de la serre [31]

Le taux de transfert d'humidité extérieure  $H_{air, ext}$  et le taux de transfert d'humidité intérieure sont également des fonctions linéaires et en fonctions de ventilation totale  $V_{vt}$ , l'humidité intérieure ( $H_{int}$ ) et l'humidité extérieure ( $H_{ext}$ ) sont indiquées comme suit :

$$\begin{aligned} H_{air, ext} &= f_{ext}(V_{vt}, H_{ext}) \approx V_{vt} \cdot H_{ext} \\ H_{air, int} &= f_{int}(V_{vt}, H_{int}) \approx V_{vt} \cdot H_{int} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$H_{ext}, H_{int}$  : Humidité extérieure et intérieure de la serre respectivement [%].

A partir de ces équations on peut écrire notre modèle mathématique de la serre sous la forme suivante :

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \Psi_T(T_{int}, H_{int}, Q_{Ch}, H_{Br}, V_{v,m}, Q_{PL}, v_{air}, T_{ext}, H_e) \quad (2.21)$$

$$\frac{dH_{int}}{dt} = \Psi_H(T_{int}, H_{int}, H_{Br}, V_{v,m}, H_{PL}, R, H_{ext}, H_e) \quad (2.22)$$

## 2.8. Taux d'évapotranspiration des plantes $E(R, H_{int})$ [21]

On considère la feuille comme un film d'eau. C'est par les feuilles qu'il y a l'échange d'eau. Les racines ne font qu'alimenter l'eau qui s'est évaporée par les feuilles.

$$E(R, H_{int}) = \frac{\alpha}{\lambda} R + \frac{h_t}{\lambda \cdot \gamma} H_{int} \cdot$$

$$h_t = 1.65 \cdot LAI \cdot (1 - 0.56 \cdot e^{-\frac{R}{1.32}}) \text{ [w.m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}]$$

En remplace  $h_t$  dans  $E(R, H_{int})$  :

$$E(R, H_{int}) = \frac{0.154 \cdot \ln(1 + 1.1 \cdot LAI^{1.13})}{2.3 \cdot 10^6} \cdot R + \frac{1.65 \cdot LAI \cdot (1 - 0.56 \cdot e^{-\frac{R}{1.32}})}{2.3 \cdot 10^6 \cdot 66} \cdot H_{int} \cdot$$

$$\lambda = 2.3.10^6 \text{ j.kg}^{-1}, \gamma = 66 = \frac{R}{M_{H_2O}} \cdot \frac{C_p}{\lambda} \rho \cdot [\text{Pa}^0\text{k}],$$

$h_t$  : Enthalpie spécifique de l'air.

$\gamma$ : Constante psychométrique [ $\text{kJ.kg}^{-1} \text{ air sec}$ ]

$$E(R, H_{\text{int}}) = \frac{\alpha}{\lambda} R + \beta_T \cdot H_{\text{int}} \quad [17] \quad (2.23)$$

$$\text{Où : } \alpha = 0.154.Ln(1 + 1.1.LAI^{1.13}) \quad [32]$$

LAI : l'indice de foliaire.

La variation journalière de l'indice de foliaire est donnée par la fonction suivante :

$$\Delta LAI = a.LAI + b.LAI.Ln(LAI) + c.LAI^{1.5}$$

Avec :  $a=0.09515907$ ;  $b=-0.02929701$ ;  $c=-0.00872732$ .

A l'équilibre thermique on obtient :

$$Q_{\text{tot}} = Q_{Ch} + Q_{PL} - Q_e = Q_{Ch} + Q_{PL} - \lambda.H_e$$

=  $Q_{Ch}$  ( $Q_{PL}$  et  $Q_e$  sont négligeables devant le générateur de l'air chaud et le système d'humidification).

$$H_{\text{tot}} = H_{Br} + H_{PL} + H_e$$

$$H_{PL} + H_e = E(R, H_{\text{int}}). \quad [17]$$

Donc :

$$H_{\text{tot}} = H_{Br} + E(R, H_{\text{int}}) \quad (2.24)$$

$E(R, H_{\text{int}})$  : le taux évapotranspiration des plantes.

Les équations (2.7) et (2.8) deviennent ainsi :

$$\rho C_p V_T \frac{dT_{\text{int}}}{dt} = Q_{Ch} + Q_R - Q_V - Q_C - Q_{Br}$$

$$\rho V_H \frac{dH_{\text{int}}}{dt} = H_{\text{tot}} - H_{\text{air,int}} + H_{\text{air,ext}}$$

Notre modèle peut finalement décrire comme suit :

$$\frac{dT_{\text{int}}}{dt} = f_T(T_{\text{int}}, T_{\text{ext}}, R, V_{v,m}, Q_{\text{tot}}, H_{Br})$$

$$\frac{dH_{\text{int}}}{dt} = f_H(H_{\text{int}}, H_{\text{ext}}, R, V_{v,m}, H_{\text{tot}})$$

Selon l'équation (2.7), l'équation (2.8) et les équations ci-dessus, on peut déduire la variation de la température et l'humidité à l'intérieure de la serre comme suit :

$$\frac{dT_{\text{int}}}{dt} = \frac{1}{\rho.C_p.V_T} (Q_{Ch} + R - \lambda.H_{Br}) - \frac{V_{v,m}}{V_T} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) - \frac{UA}{\rho.C_p.V_T} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad (2.25)$$

$$\frac{dH_{\text{int}}}{dt} = \frac{1}{\rho.V_H} H_{Br} + \frac{1}{\rho.V_H} E(R, H_{\text{int}}) - \frac{V_{v,m}}{\rho.V_H} (H_{\text{int}} - H_{\text{ext}}) \quad (2.26)$$

Les variables  $T_{\text{ext}}$ ,  $H_{\text{ext}}$  et  $R$  représentent des perturbations extérieures de la serre qui déterminent l'influence atmosphérique sur  $T_{\text{int}}$  et  $H_{\text{int}}$ .

$Q_{Ch}$ ,  $V_{v,m}$  et  $H_{Br}$  sont des commandes pour le système du chauffage, du refroidisseur et du système du brouillard respectivement.

De l'analyse précédente, il apparaît clairement que notre modèle physique est non linéaire et couplé comme indique les équations (2.25) et (2.26).

La forme du modèle décrite par les équations (2.25) et (2.26) nous permet d'appliquer des techniques non linéaires feedback et feedforward et le découplage par la nouvelle commande qui est alimenté en entrée. D'ailleurs, à partir de ce modèle on peut estimer l'influence des perturbations au système.

## 2.9. Linéarisation et découplage du système

Notre modèle non linéaire et couplé, pour linéariser et découpler ce système, nous allons développer la technique d'intelligence sans agissant l'un sur l'autre proposée par sigrimis et arvanitis2002.

Cependant, une serre est soumise à trois perturbations (qui sont le rayonnement solaire, la température extérieure et l'humidité extérieure) relativement de basses fréquences. En effet, ces perturbations sont considérées comme « charge ».

### 2.10. Modèle dynamique du climat d'une serre agricole : [26] [29]

Notre modèle dynamique peut être décrit par un système d'équations qui peut être représenté comme suit :

$$\dot{X} = f(x, u, v) = A(x, v) + B(x, v)u \quad (2.27)$$

Avec :

$X \in \mathfrak{R}^n$  : Vecteur d'état.

$U_i$  et  $Y_i$  ;  $i=1,2,\dots,p$  : Commandes d'entrée et de sortie.

$V \in \mathfrak{R}^d$  : Vecteur de perturbation.

$A(x, v)$  et  $B(x, v)$  sont des fonctions évaluées par des matrices analytiques.

Dans le cas où des perturbations peuvent être mesurées, donc le système (2.27) peut avoir la forme suivante :

$$Y_i^{(r_i)} = f_i(x, v) + g_i^T(x, v)U, \quad i=1,2,\dots,p \quad (2.28)$$

$r_i$  : Degré relatif du système, on suppose la matrice  $D(x, v)$  suivante :

La matrice  $D(X, V)$ , est donnée par :

$$D(x, v) = \begin{bmatrix} g_1^T(x, v) \\ g_2^T(x, v) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g_p^T(x, v) \end{bmatrix}$$

$D(x, v)$  : Matrice non singulière.

Donc la loi de commande feedback/ feedforward est écrite comme suit :

$$U = D^{-1}(x, v) \left\{ - \begin{bmatrix} f_1(x, v) \\ f_2(x, v) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_p(x, v) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{u}_p \end{bmatrix} \right\} \quad (2.29)$$

Avec:  $\hat{u}_i$ :  $i=1,2,\dots,p$  : Ensemble d'entrées externes, rend le système en boucle fermée

E/S linéaire et découplé avec perturbation d'isolement ayant la forme suivante : [20]

$$y_i^{r_i} = \hat{U}_i \quad (2.30)$$

### 2.10.1 Remarque [13]

si  $\sum_{i=1}^p r_i < n$  : alors le système (2.27) contient un ensemble d'état inobservables, appelés dynamique interne, pour que le système en boucle fermée stable, la dynamique interne du système doit être nulle par des nouvelles commandes en entrées.

Evidement, le système en boucle fermée (2.30) peut être maintenant commandé en ajoutant une commande externe " boucle externe", pour satisfaire, quelque paramètres de cette boucle d'asservissement, ce dernier peut être basé sur n'importe quelle stratégie linéaire conventionnelle de commande, et aussi peut être simple comme contrôleur PID.

Avec l'application de la loi externe de commande sous la forme : [23]

$$\hat{U}_i = -\sum_{j=0}^{r_i-1} a_{ij} Y_i^{(j)} + b_i \tilde{U}_i \quad (2.31)$$

Le nouveau système en boucle fermée aura la forme :  $Y_i^{(r_i)} + \sum_{j=0}^{r_i-1} a_{ij} y_i^{(j)} = b_i \tilde{U}_i$

En outre, il faut composer les perturbations qui n'est pas été prises en considération dans (2.27) ou les incertitudes paramétriques pour atteindre la convergence asymptotique de l'erreur à zéro, en dépit de ces incertitudes, une commande additionnelle de la boucle avec l'action intégrale (par exemple contrôleur PID) doit être utile dans la plus part des cas.

### 2.10.2 Modèle de commande de la serre

Le modèle de commande de la serre est simple, peut être obtenu en considérant les équations (2.25) et (2.26) trouvées dans le chapitre2 comme suit :

$$\frac{dT_{\text{int}}}{dt} = \frac{1}{\rho.C_p.V} (Q_{ch} + R - \lambda.H_{Br}) - \frac{V_{v,m}}{V} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) - \frac{UA}{\rho.C_p.V} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad (2.32)$$

$$\frac{dH_{\text{int}}}{dt} = \frac{1}{\rho.V} H_{Br} + \frac{1}{\rho.V} E(R, H_{\text{int}}) - \frac{V_{v,m}}{\rho.V} (H_{\text{int}} - H_{\text{ext}}) \quad (2.33)$$

Pour l'opération d'été, on met  $Q_{ch}=0$  dans l'équation (2.32), on peut alors noter que dans une première approximation le taux d'évapotranspirations  $E(R, H_{int})$  est dans la plupart des parties liés à l'énergie solaire radiante, par la relation simplifiée suivante :

$$E(R, H_{int}) = \alpha \frac{R}{\lambda} - \beta_r(H_{int}) \quad (2.34)$$

Sur la base de ces observations, les relations (2.32) et (2.33) prennent les formes suivantes :

$$\frac{dT_{int}}{dT} = \frac{1}{\rho \cdot C_p \cdot V} (R - \lambda \cdot H_{Br}) - \frac{V_{v,m}}{V} (T_{int} - T_{ext}) - \frac{UA}{\rho \cdot C_p \cdot V} (T_{int} - T_{ext}) \quad (2.35)$$

$$\frac{dH_{int}}{dT} = -\frac{\beta_r}{\rho \cdot V} H_{int} + \frac{1}{\rho \cdot V} H_{Br} + \frac{\alpha}{\lambda \cdot V} R - \frac{V_{v,m}}{\rho \cdot V} (H_{int} - H_{ext}) \quad (2.36)$$

Cependant, les relations (2.35) et (2.36) peuvent alternativement être écrites sous la forme (3.18) où dans le cas présent :

$$\begin{aligned} X &= [X_1 \quad X_2]^T \hat{=} [T_{int} \quad H_{int}]^T; Y = X; r_1 = r_2 = 1 \\ U &= [U_1 \quad U_2]^T \hat{=} [V_{v,m} \quad H_{Br}]^T \\ V &= [V_1 \quad V_2 \quad V_3]^T = [R \quad T_{ext} \quad H_{ext}]^T \end{aligned}$$

Ces variables de perturbations du modèle d'aération (chauffage/ refroidissement) de la serre peuvent être facilement mesurées par l'instrumentation installée dans le camp météorologique dans la serre.

En outre, la complexité de tels systèmes est plutôt soulagée par le fait que les états du système changent lentement et dépendent de paramètre  $B_T$  qui peut être considéré constant.

Par conséquent, dans ce cas, la linéarisation combinée de feedback avec feedforward est possible.

### 2.11. Commande du modèle de ventilation et de brouillard

Dans ce qui suit, la méthode de contrôle présentée est appliquée au modèle de ventilation de la serre, aussi pour le système humidificateur la matrice  $D(X, V)$  est donnée

par :

$$D(X,V) = \frac{1}{V} \begin{bmatrix} V_2(t) - X_1(t) & -\frac{\lambda}{\rho C_p} \\ V_3(t) - X_2(t) & 1 \end{bmatrix}$$

Le déterminant doit être non nul, par ce que le système E/S peut être linéaire et découplé avec perturbation d'isolement (2.30). Dans ce modèle, la somme de degré relatif est égale à la dimension du système, tellement il n'y a aucune dynamique interne, dans le cas où déterminant =0, l'entrée  $U_1(t)$  affecte les états du système  $X_1(t)$  et  $X_2(t)$ , avec exactement la même manière que  $U_2(t)$  est découplé de ce fait, aussi bien pour feedback et feedforward la linéarisation est impossible,

Nous avons appliqué même algorithme de commande ci-dessus peut être récapitulé dans les deux relations suivantes : (voir la méthode en annexe)

$$U_1 = Q^{-1} \left[ \frac{\rho C_p V}{\tau_1} \tilde{U}_1 + \frac{\lambda V}{\tau_2} \tilde{U}_2 - (\alpha + 1) V_1 - U A V_2 + \left( U A - \frac{\rho C_p V}{\tau_1} \right) X_1 + \left( \lambda B_T - \frac{\lambda V}{\tau_2} \right) X_2 \right] \quad (2.37)$$

$$U_2 = Q^{-1} \left[ \left( U A - \frac{\rho C_p V}{\tau_1} \right) X_1 + \frac{\rho C_p V}{\tau_1} \tilde{U}_1 - V_1 - U A V_2 \right] - (X_2 - V_3) + Q^{-1} \cdot \rho C_p V \left[ \left( \beta_T - \frac{V}{\tau_2} \right) X_2 + \frac{V}{\tau_2} \tilde{U}_2 - \frac{\alpha}{\lambda} V_1 \right] (V_2 - X_1) \quad (2.38)$$

Avec:  $Q = \rho C_p [V_2 - X_1] + \lambda [V_3 - X_2]$ .

## 2.12. Commande du modèle de ventilation et de chauffage

Dans ce qui suit, la méthode de contrôle présentée est appliquée au modèle de ventilation de la serre, aussi bien pour le système de chauffage.

En Hiver,  $H_{int} \geq H_{ext}$ ,  $H_{Br}=0$ , alors notre système prend la forme suivante:

$$\frac{dT_{int}}{dT} = \frac{1}{\rho C_p V} (Q_{Ch} + R) - \frac{V_{v,m} t}{V} (T_{int} - T_{ext}) - \frac{U A}{\rho C_p V} (T_{int} - T_{ext}) \quad (2.39)$$

$$\frac{dH_{int}}{dT} = -\frac{\beta_T}{\rho V} H_{int} + \frac{\alpha}{\lambda V} R - \frac{V_{v,m}}{\rho V} (H_{int} - H_{ext}) \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}
X &= [X_1 \quad X_2]^T \hat{=} [T_{\text{int}} \quad H_{\text{int}}]^T; Y = X; r_1 = r_2 = 1 \\
U &= [U_1 \quad U_3]^T \hat{=} [V_{v,m} \quad Q_{Ch}]^T \\
V &= [V_1 \quad V_2 \quad V_3]^T = [R \quad T_{\text{ext}} \quad H_{\text{ext}}]^T
\end{aligned}$$

Donc le nouveau system peut écrié sous la forme suivant :

$$\begin{aligned}
\frac{dX_1}{dT} &= \frac{1}{\rho \cdot C_p \cdot V} (U_1 + V_1) - \frac{U_1}{V} (X_1 - V_2) - \frac{UA}{\rho \cdot C_p \cdot V} (X_1 - V_2) \\
\frac{dX_2}{dT} &= -\frac{\beta_T}{\rho \cdot V} X_2 + \frac{\alpha}{\lambda \cdot V} V_1 - \frac{U_1}{\rho \cdot V} (X_2 - V_3) \\
D(X, V) &= \begin{bmatrix} g_1^T(X, V) \\ g_2^T(X, V) \end{bmatrix} = \frac{1}{V} \begin{bmatrix} V_2 - X_1 & \frac{1}{\rho C_p} \\ V_3 - X_2 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Le déterminant de la matrice D(X,V) doit être non nul, nous avons appliqué même algorithme ci-dessus donc, les commandes pour l'opération d'hiver peut être récapitulé dans les deux relations suivantes: (voir la méthode en annexe)

$$U_1 = \frac{1}{dt} \left( \frac{1}{\rho C_p \tau_2} X_1 - \frac{\beta_t}{\rho C_p V} X_2 + \frac{\alpha}{\lambda \rho C_p V} V_1 - \frac{1}{\rho C_p \tau_2} \tilde{U}_2 \right) \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned}
U_2 &= \frac{1}{dt} \left[ \left( \frac{UA}{\rho C_p V} X_1 - \frac{1}{\rho C_p V} V_1 - \frac{UA}{\rho C_p V} V_2 - \frac{1}{\tau_1} X_1 + \frac{1}{\tau_1} \tilde{U}_1 \right) (X_2 - V_3) \right. \\
&\quad \left. + \left( \frac{\beta_T}{V} X_2 - \frac{\alpha}{\lambda V} V_1 - \frac{1}{\tau_2} X_1 + \frac{1}{\tau_2} \tilde{U}_2 \right) (V_2 - X_1) \right] \quad (2.42)
\end{aligned}$$

### 2.13. Conclusion

Ce chapitre nous l'avons consacré a la modélisation d'une serre agricole, qui intègre l'ensemble des processus qui régissent les échanges thermiques entre la couverture, l'air intérieur, l'air extérieur, les plantes et les échangeurs de chaleur : conduction, évaporation, condensation, rayonnements solaires.

Ce modèle dynamique du bilan d'énergie dans une serre agricole est fortement non linéaire en ce qui concerne la température (Chauffage/Refroidissement) et l'humidité comme indique dans les équations (2.25) et (2.26). Cette étude nous permettra d'aborder aisément les outils de contrôle de notre serre.

## CHAPITRE 3 STRATEGIE DE COMMANDE ET SIMULATION

### 3.1 Introduction

Le contrôle de l'environnement à l'intérieur de la serre a une grande influence sur la croissance des plantes, Le modèle dynamique d'une serre agricole détaillé dans le chapitre précédent nous permettra d'optimiser sa gestion. [26]

Dans ce chapitre, nous allons présenter: Au premier lieu, les outils de contrôle qui seront utilisés dans notre travail, nous développerons des contrôleurs dynamiques PID, PDF et le contrôleur flou.

Au second lieu, nous allons simuler les sorties de notre système (Température intérieure et humidité intérieure) à l'aide d'un programme réalisé sous logiciel MATLAB, l'outil SIMULINK et des fonctions de quelques boites à outils en exploitant les régulateurs PDOF et flou.

### 3.2. Schéma synoptique de la serre agricole

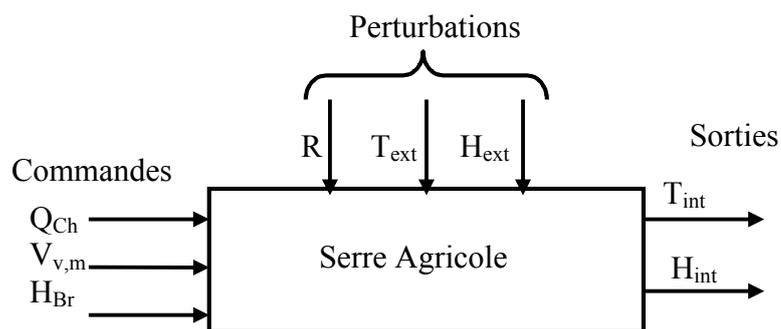


Figure 3.1: Schéma synoptique de la serre agricole.

On peut considérer la serre comme une boîte noire, ayant: les entrées commandes, les perturbations et les sorties comme représenté dans la figure.3.1

Les entrées commandes sont:

- $Q_{Ch}$  : La Chaleur fournie par le système du chauffage de la serre (w).
- $V_{v,m}$  : Le taux de ventilation ( $m^3/s$ ).
- $H_{Br}$  : Le taux d'évaporation de l'eau du système de brouillard (kg/h).

Les perturbations sont:

- $R$  : L'énergie solaire radiante (w).
- $T_{ext}$  : La température extérieure ( $^{\circ}C$ ).
- $H_{ext}$  : L'humidité extérieure (%).

Les sorties sont:

- $T_{int}$  : La température intérieure ( $^{\circ}C$ ).
- $H_{int}$  : L'humidité intérieure (%).

### 3.3. Correcteur PID

L'algorithme PID (proportionnel intégral dérivé) est le contrôleur le plus utilisé comme moyen d'asservissement dans le domaine industriel. Il a été employé avec succès depuis plus de 50 ans. C'est un robuste algorithme facile à implémenter et fournit des excellentes performances de contrôle pour une grande variété de procédés industriels.

Le schéma de commande d'un procédé industriel utilisant le correcteur PID prend généralement la forme suivante :

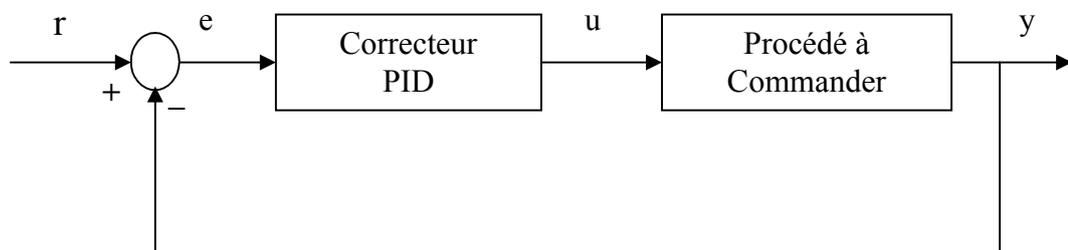


Figure 3.2: Schéma de commande avec correcteur de PID.

Avec :

- $r$  : la consigne désirée.

- $y$  : le signal de sortie à commander.
- $e$  : l'erreur entre la consigne et le signal de sortie.
- $u$  : le signal de commande du procédé.

### Description du correcteur

Comme son nom l'indique, l'algorithme PID se caractérise par trois actions de base, l'action proportionnelle, l'action intégrale et l'action dérivée. Sous la forme continue, ce correcteur s'écrit :

$$u(t) = k_c e(t) + \frac{k_i}{T_i} \int_0^t e(t) dt + k_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

L'action proportionnelle est essentielle au fonctionnement du PID. Elle permet essentiellement de donner de la puissance au signal de commande en agissant sur le coefficient  $K_c$ . Plus  $K_c$  est grand, plus le système converge vite vers sa valeur finale. Mais en contrepartie, pour des valeurs de  $K_c$  trop grandes, le système oscille et génère des dépassements.

Le problème majeur avec des proportionnelles est que le signal de sortie n'atteint jamais la consigne désirée. C'est ce que l'on appelle l'erreur statique, elle correspond à la différence entre le signal généré et le signal désiré en régime permanent. Pour compenser cette erreur statique, on rajoute le terme intégral.

Le correcteur intégral sert principalement à supprimer l'erreur statique. L'idée principale est de charger ou intégrer l'erreur depuis le début et d'ajouter cette erreur au signal de sortie jusqu'à ce qu'elle devienne nulle. Lorsque cette erreur est nulle, le terme intégral se stabilise et compense parfaitement l'erreur entre la consigne et le signal de sortie. L'erreur statique s'est éliminée avec un correcteur PI, le système oscille encore et les dépassements sont plus grands. Le terme dérivé est préconisé pour permettre de diminuer considérablement ces dépassements. [33] [27].

### 3.4. Régulation par le contrôleur PDF (Pseudo-Derivative Feedback Controllers)

La structure générale de la commande PDF est une modification de la commande IDF (intégral control with derivative-feedback). L'algorithme IDF à un intégrateur en avant et une dérivée en retour, le schéma global de l'algorithme IDF est donné dans la figure 3.2.

Mathématiquement, cela idéalise bien le fonctionnement du contrôleur, mais dans les applications pratiques, les dérivées de la variable de commande représentent un bruit

significatif, particulièrement pour la dérivée de second d'ordre et plus.

La structure générale de contrôleur PDF est différente. Toutes les variables commandées de la dérivée dans une chaîne de retour sont déplacées vers l'intégrateur de sortie. Cette approche réduit le nombre de dérivés d'un degré. Un diagramme schématique de la structure générale de la commande de PDF est représenté dans la figure 3.3. Bien que les coefficients de la commande pour l'algorithme IDF et les structures générales de la commande de PDF soient différents, les simulations prouvent qu'elles ont une réponse semblable.

Actuellement, le contrôleur de PDF est une variation du contrôleur conventionnel PID, différant dans les points principaux suivants : [28]

- La configuration standard de contrôleur PID se compose généralement d'un gain proportionnel qui comporte une partie dynamique contenant des intégrateurs et des dérivateurs, avec tous les éléments de contrôleur situés dans la chaîne d'action. En revanche, les éléments du contrôleur de PDF sont convenablement placés dans les deux chaînes (d'action et de retour). Cette configuration contribue à une meilleure position de l'action de contrôleur, puisque les éléments situés dans le chemin de retour sont principalement consacrés à obtenir les performances désirées en boucle fermée (stabilité, réponse, atténuation de perturbation, etc.), tandis que les éléments en chaîne d'action sont employées pour éliminer les erreurs.
- Le contrôleur conventionnel PID agit sur l'erreur de processus avec le résultat où chaque élément contribue aux pôles en boucle fermée aussi bien qu'aux zéros. En revanche les éléments du contrôleur PDF ne contribuent pas aux zéros en boucle fermée, et par conséquent ils n'augmentent pas les dépassements dans la réponse en boucle fermée.
- Les contrôleurs de PDF peuvent réaliser l'amortissement critique avec un temps de stabilité plus rapide qu'un contrôleur de PID avec dépassement.
- Dans le cas des contrôleurs PDF, non seulement il n'y a pas d'erreur à l'état stable, mais le système de commande peut être rendu immunisé contre la divergence de la réponse idéale à une rampe en ajoutant une dérivée d'ordre plus élevé.

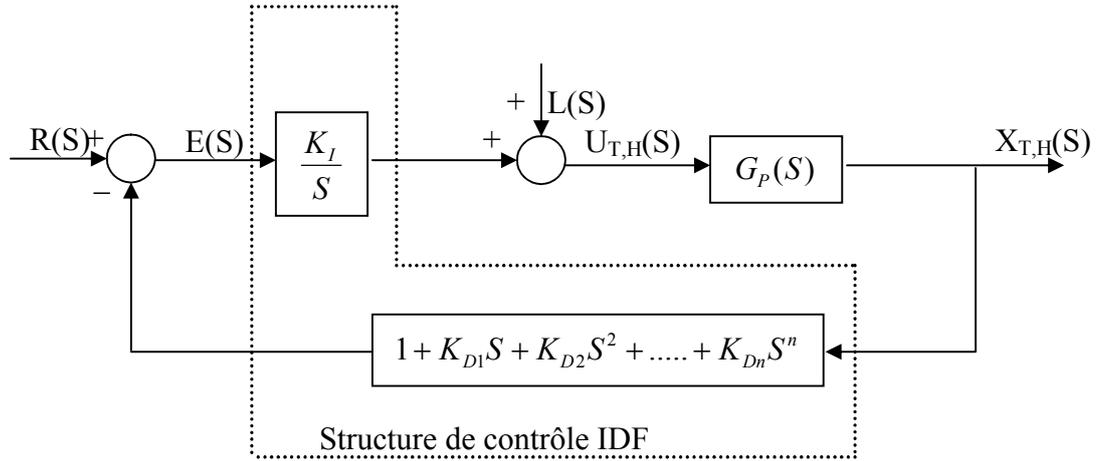


Figure 3.3: Structure générale de la commande IDF

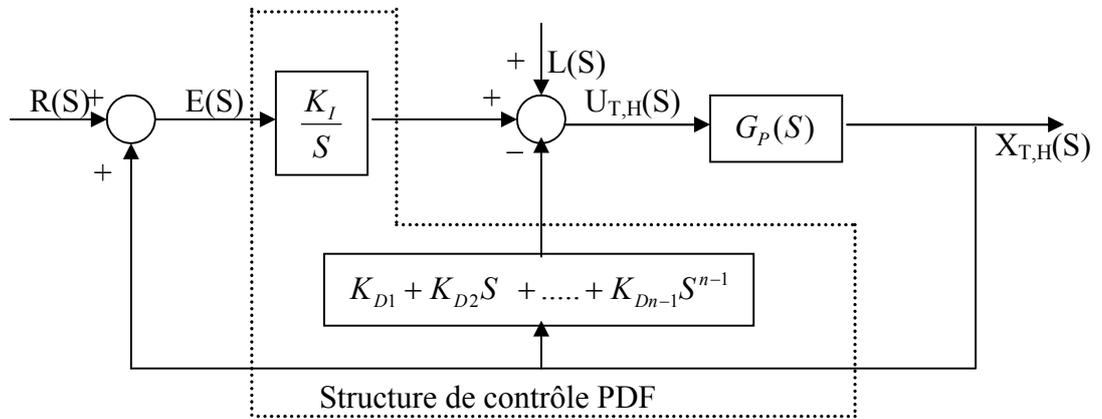


Figure 3.4: Structure générale de la commande PDF

### 3.5. Méthode de traitement

Soient  $U_T(t)$  et  $U_H(t)$  nouvelles commandes qui rend notre système linéaire et découplé. En appliquant ces lois de commande dans le modèle non linéaire et couplée (2.25) et (2.26), le système résultant en boucle fermée sera linéaire et découplé, et on obtiendra la forme suivante :

$$\dot{x}_T(t) = -\frac{UA}{\rho \cdot C_p \cdot V} x_T(t) + \tilde{K}_T \tilde{U}_T(t) \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_H(t) = -\frac{\beta_T}{V} x_H(t) + \tilde{K}_H \tilde{U}_H(t) \quad (3.3)$$

La température et l'humidité intérieures de la serre sont mesurées par un thermomètre et un hygromètre, respectivement, généralement localisé à une certaine distance des ventilateurs de la serre et du système de brouillard. Les hygromètres peuvent présenter un temps de retard significatif, par conséquent, les changements de la température et de l'humidité sont déterminés après un certain délai  $d_T$  et  $d_H$  respectivement ( $d_T < d_H$ ), avec cette observation, il est facile de vérifier que la réponse aux changements d'entrée peut être décrite par fonction de transfert suivante:

$$X_T(S) = \frac{K_T \cdot e^{-d_T S}}{\tau_T S + 1} \tilde{U}_T(S) \equiv G_T(S) \tilde{U}_T(S) \quad (3.4)$$

$$X_H(S) = \frac{K_H \cdot e^{-d_H S}}{\tau_H S + 1} \tilde{U}_H(S) \equiv G_H(S) \tilde{U}_H(S) \quad (3.5)$$

Avec  $X_T(S)$ ,  $X_H(S)$ ,  $\tilde{U}_T(S)$  et  $\tilde{U}_H(S)$  sont des transformés de la place de  $x_T(t)$ ,  $x_H(t)$ ,  $u_T(t)$  et  $u_H(t)$  respectivement, et :

$$\tau_T = \frac{\rho \cdot C_p \cdot V}{UA}, \quad K_T = \frac{\rho \cdot C_p \cdot V}{UA} \tilde{K}_T, \quad \tau_H = \frac{V}{\beta_T}, \quad K_H = \frac{V}{\beta_T} \tilde{K}_H.$$

Dans les conditions de refroidissement par évaporation d'été et dans certains résultats  $\beta_T H_{int}(t)$  de l'équation (2.23) est relativement faible.

En omettant ce terme, la deuxième équation d'état (2.26) deviendra un intégrateur parfait. Dans ce cas, les relations (3.3) et (3.5) prennent la forme suivante :

$$\dot{x}_H(t) = \tilde{K}_H \tilde{U}_H(t) \quad (3.6)$$

$$X_H(S) = \frac{K_H \cdot e^{-d_H S}}{S} \tilde{U}_H(S) \equiv G_H(S) \tilde{U}_H(S) \quad (3.7)$$

En se basant sur les équations (3.4) et (3.7), les changements de température sont contrôlés par un régulateur de premier ordre tandis que les changements d'humidité sont contrôlés par un intégrateur. Nous sommes maintenant capable de commander la température et l'humidité séparément en utilisant plusieurs types de contrôleurs simples (contrôleurs de PID, contrôleurs prédictifs, etc.). Dans cet exemple, pour exécuter les modifications, nous préférons d'adopter le régulateur (PDF) (pseudo dérivé feedback Contrôler) [3], [7]. Comme elle est indiquée dans la figure 3.3.

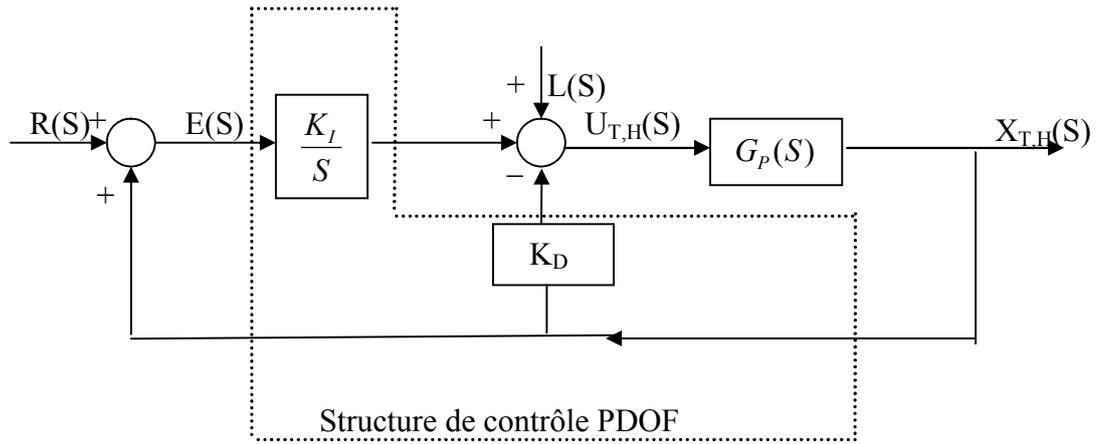


Figure 3.5: Structure de la commande de PD0F appliquée au modèle de processus.

La réponse aux variations de charge quand un contrôleur PDF est employé est meilleure que celle obtenue par des contrôleurs PID. Dans l'exemple, nous focalisons sur le cas le plus simple possible dans la structure générale de commande PDF, représenté dans la figure 3.4. Nous appelons ce système feedback et feedforward « la structure de control PD-0F » analysera après le comportement spécifique de feedback, particulièrement dans le cas où le système sous control de fonction de transfert de la forme (3.4) et (3.7).

À cet effet, on peut observer que pour un modèle de la forme (3.4) ou pour un modèle de la forme (3.7), la fonction de transfert en boucle fermée du system  $G_{CL}(S)$  prend la forme :

$$G_{BF}(S) = \frac{K_I G_p(S)}{S + (K_D S + K_I) G_p(S)} \quad (3.8)$$

Où  $G_p(S) = G_T(S)$  ou  $G_H(S)$

De (3.4), (3.7) et (3.8), nous obtenons :

$$G_{BF,T}(S) = \frac{e^{-d_T S}}{S \left( \frac{\tau_T}{K_T K_{I,T}} S + \frac{1}{K_T K_{I,T}} \right) + \left( \frac{K_{D,T}}{K_{I,T}} S + 1 \right) e^{-d_T S}} \quad (3.9)$$

$$G_{BF,H}(S) = \frac{e^{-d_H S}}{\frac{1}{\tilde{K}_H K_{I,H}} S^2 + \left( \frac{K_{D,H}}{K_{I,H}} S + 1 \right) e^{-d_H S}} \quad (3.10)$$

### 3.6. Régulation par le contrôleur PD0F

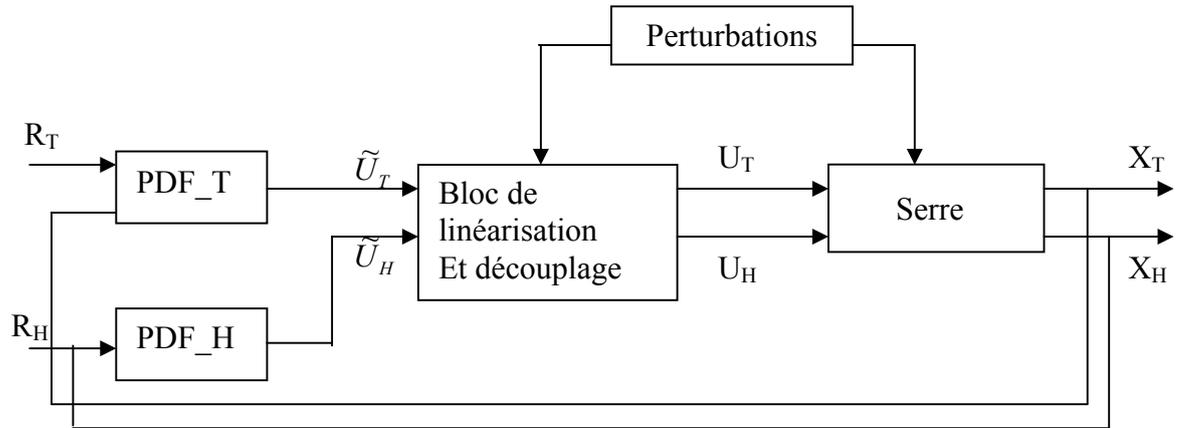


Figure 3.6: Stratégie globale de la commande

Le branchement du contrôleur PD0F pour les modèles de la forme (3.4) et (3.7), le concepteur essaye de satisfaire plusieurs objectifs en considérant la performance aussi bien que la robustesse du système en boucle fermée. Plusieurs méthodes de branchement des contrôleurs simples sont disponibles aujourd'hui pour des objectifs uniques tels que le rapport d'affaiblissement, les marges de phase et de gain, pic résonnant et fréquence, dépassement, et certains critères d'erreur intégrales. Une méthode simple pour le branchement de contrôleur PD0F est comme suit : les réponses désirées peuvent être décrites par les modèles suivants :

$$H_T(S) = \frac{e^{-d_T S}}{\lambda_T S + 1}, H_H(S) = \frac{e^{-d_H S}}{\lambda_H S + 1} \quad (3.11)$$

$\lambda_T$  et  $\lambda_H$  Respectivement, sont les constants de temps désirés.

On égalisant (3.9) avec la première équation (3.11) et (3.10) avec de la deuxième équation, en utilisant les approximations suivantes pour l'exponentielle de dénominateur de (3.9) et (3.10) :

$$e^{-d_T S} = 1 - d_T S, e^{-d_H S} = 1 - d_H S \quad (3.12)$$

Nous obtenons :

$$K_{D,T} = \frac{\tau_T}{K_T d_T}, K_{I,T} = \frac{d_T + \tau_T}{K_T d_T (\lambda_T + d_T)}$$

$$K_{D,H} = \frac{1}{d_H K_H}, K_{I,H} = \frac{1}{d_H K_H (\lambda_H + d_H)}$$

$$\lambda_T \succ 10d_T \text{ et } \lambda_H \succ 10d_H$$

Malheureusement, bien que ce qui accorde soit très simple, il est également défectueux, parce que, pour obtenir un système en boucle fermée qui assortit d'une manière satisfaisante le modèle désiré, on doit sélectionner  $\lambda_T \text{ et } (\lambda_H)$  beaucoup plus grand que le découlement de temps de retard  $\lambda_T \succ 10d_T \text{ et } \lambda_H \succ 10d_H$  ou plus, de ce fait produisant une réponse très lente. Pour permettre des réponses plus rapides, la méthode basée sur les calculs des paramètres du système en boucle fermée. Cette méthode est comme suit :

Sur la base de (3.12), relations (3.9) et (3.10) et les réponses désirées peuvent être comme suit :

$$G_{BF,T} = \frac{e^{-d_T S}}{\tau_{T,1} S^2 + 2\xi_{T,1} \tau_{T,1} S + 1} \quad (3.13)$$

$$G_{BF,H} = \frac{e^{-d_H S}}{\tau_{H,1} S^2 + 2\xi_{H,1} \tau_{H,1} S + 1} \quad (3.14)$$

On identifiant (3.9) avec (3.13) et (3.10) avec (3.14), nous obtenons :

$$\tau_{T,1} = \sqrt{\frac{\tau_T}{K_T \cdot K_{I,T}} - \frac{d_T \cdot K_{D,T}}{K_{I,T}}}, \quad \xi_{T,1} = \frac{\frac{1}{K_T \cdot K_{I,T}} + \frac{K_{D,T}}{K_{I,T}} - d_T}{2\sqrt{\frac{\tau_T}{K_T \cdot K_{I,T}} - \frac{d_T \cdot K_{D,T}}{K_{I,T}}}} \quad (3.15)$$

$$\tau_{H,1} = \sqrt{\frac{1}{\tilde{K}_H \cdot K_{I,H}} - \frac{d_H \cdot K_{D,H}}{K_{I,H}}}, \quad \xi_{H,1} = \frac{\frac{K_{D,H}}{K_{I,H}} - d_H}{2\sqrt{\frac{1}{\tilde{K}_H \cdot K_{I,H}} - \frac{d_H \cdot K_{D,H}}{K_{I,H}}}} \quad (3.16)$$

Maintenant choissant :  $\tau_{T,1} = \tau_{T,2}$  et  $\xi_{T,1} = \xi_{T,2}$ , on résoudre (3.15)

$$K_{D,T} = \frac{\tau_T}{d_T \cdot K_{D,T}} - \frac{\tau^2_{T,2} (d_T + \tau_T)}{d_T \cdot K_T (2 \cdot d_T \xi_{T,2} \tau_{T,2} + \tau^2_{T,2} + d^2_T)}$$

$$K_{I,T} = \frac{d_T + \tau_T}{K_T (2 \cdot d_T \xi_{T,2} \tau_{T,2} + \tau^2_{T,2} + d^2_T)}$$

De même, choisissant  $\tau_{H,1} = \tau_{H,2}$  et  $\xi_{H,1} = \xi_{H,2}$  on résoudre (3.16), nous obtenons :

$$K_{D,H} = \frac{1}{d_H \cdot \tilde{K}_H} - \frac{\tau_{H,2}^2}{d_H \cdot \tilde{K}_H (2 \cdot d_H \xi_{H,2} \tau_{H,2} + \tau_{H,2}^2 + d_H^2)}$$

$$K_{I,H} = \frac{1}{\tilde{K}_H (2 \cdot d_H \xi_{H,2} \tau_{H,2} + \tau_{H,2}^2 + d_H^2)}$$

Remarque: le choix  $\tau_{T,2}$  et  $\xi_{T,2}$  respectivement ( $\tau_{H,2}$  et  $\xi_{H,2}$ ), qui sont liés à la loi de commande feedforward et feedback, se fond sur des mesures d'état actuel ( $T_{int}$ ,  $H_{int}$ ) et de perturbation.

Par conséquent, le temps de retard peut affecter le procédé de linéarisation feedback/feedforward et pourrait dégrader son exécution.

Pour éviter ce problème, on doit choisir  $\tau_{T,2}$  et/ou  $\xi_{T,2}$  (respectivement,  $\tau_{H,2}$  et/ou  $\xi_{H,2}$ ) qui sont liés à la vitesse de la réaction de système en circuit fermé assez grand, pour avoir en conséquence un système en circuit fermé relativement lent. Par exemple,  $\tau_{T,2} > 4d_T$  ( $\tau_{H,2} > 4d_H$ ), et/ou  $\xi_{T,2} > 1$  ( $\xi_{H,2} > 1$ ) semblent être des compromis tout à fait satisfaisants entre la vitesse de la réaction de système en circuit fermé et l'exécution de feedback/feedforward linéarisant la loi de commande. [18]

### 3.7. Simulation

Par programmation en langage MATLAB, on va simuler les réponses de notre système (Serre Agricole) par la commande feedback et feedforward de PD-OF et par commande du contrôleur flou.

### 3.8. Régulation de la température et de l'humidité par contrôleur PDOF

#### 3.8.1. Schéma fonctionnel

Nous allons représenter les équations (2.32) et (2.33) et des nouvelles commandes feedback/feedforward sous forme de blocs de fonctions de librairie SIMULINK, comme indique la figure 3.7. La sortie est accordée à un bloc (to File) appelé serre, qui peut exécuter un programme saisi dans l'éditeur Matlab, ce fichier de l'extension .m. [19].

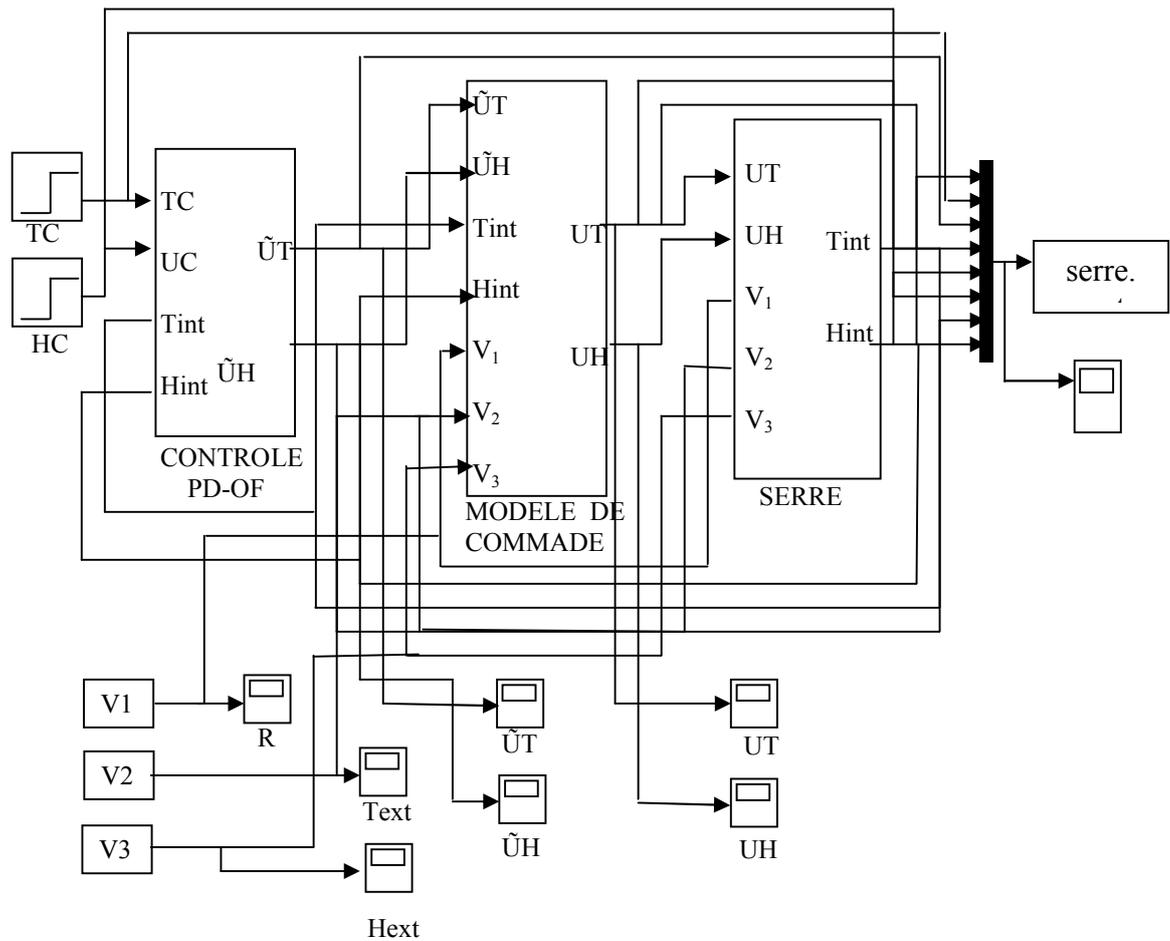


Figure 3.7: Schéma bloc détaillé avec contrôle de la serre.

Dans ce qui suit, nous allons démontrer par une série d'expériences l'efficacité de la régulation par le contrôleur PD0F. Pour cela, nous considérons une serre de superficie  $1000\text{m}^2$  et d'une taille de 4m. La serre a un écran ombrageant qui réduit l'énergie radiante solaire d'incident de 60%. Le coefficient de transfert thermique est  $UA = 25 \text{ kW.K}^{-1}$ , la densité de l'air est égale  $1,2 \text{ Kg.m}^{-3}$  avec la chaleur spécifique  $1006 \text{ j.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Nous supposons que, le capteur contribue un temps de retard global de 0.5 minute dans des mesures de la température et d'humidité (*c.-à-d.*,  $d_T = d_H = 0.5 \text{ minute}$ ).

### 3.8.2. Premier test sans changement des conditions extérieures

#### 3.8.2.1. Contrôle du système sans changement de consigne (point de réglage)

Dans cette partie de simulation, on va tester l'efficacité de nos contrôleurs qui ont été mis dans la simulation (PD - OFT et PD - OFH). Pour que ces deux contrôleurs réalisent l'exécution désirée, nous obtenons  $KIT=5$ ,  $KDT=20$ ,  $KIH=550$  et  $KDH=4320$ . Les

conditions atmosphériques extérieures sont :  $T_{\text{ext}}= 32^{\circ}\text{C}$ ,  $H_{\text{ext}}=82\%$  et  $R= 700\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .  
 $TC=22^{\circ}\text{C}$ ,  $HC=75\%$

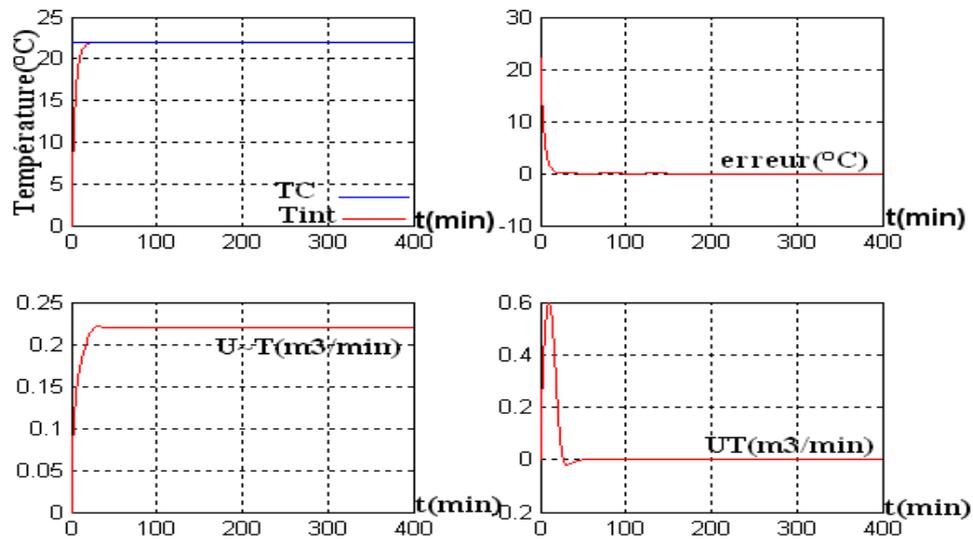


Figure 3.8: Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.

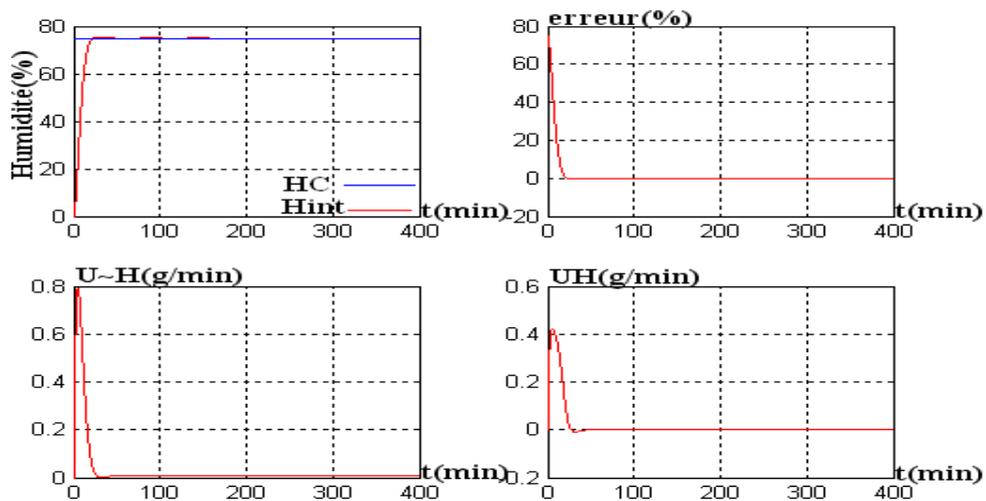


Figure 3.9: Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.

### 3.8.2.2. Contrôle avec changement de consigne

Maintenant, nous allons tester nos contrôleurs en changeant l'étape des points de réglage, le point de réglage de rapport d'humidité sera augmenté à  $t=200\text{min}$  de 60% à

75%, et pour la température diminué a  $t=150\text{min}$  de  $30^{\circ}\text{C}$  à  $20^{\circ}\text{C}$ . Avec même conditions atmosphériques extérieures.

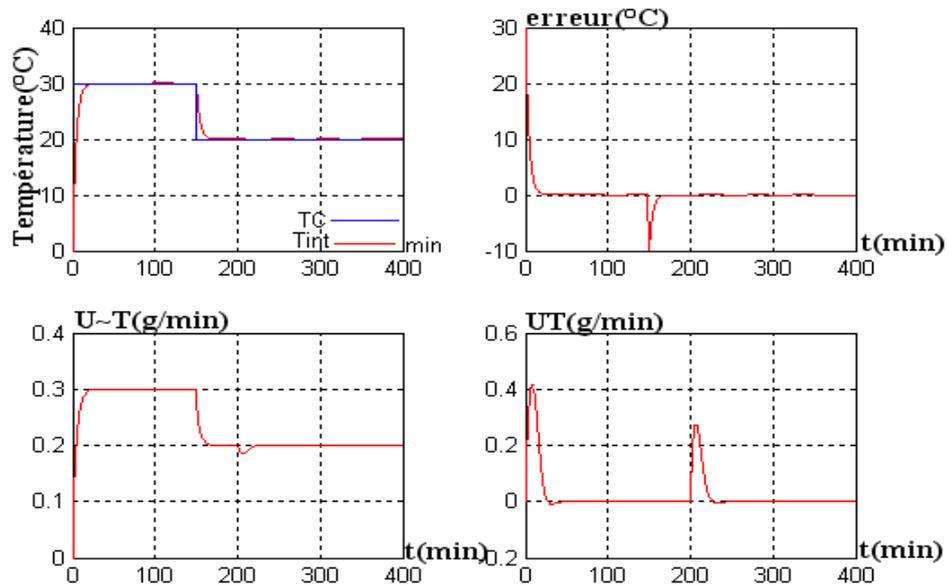


Figure 3.10: Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement d'étape de la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.

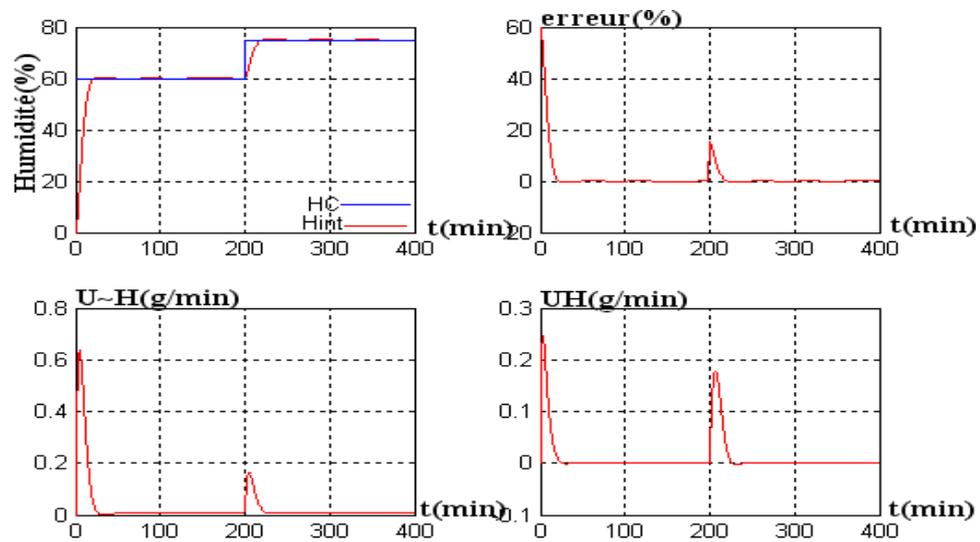


Figure 3.11: Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement d'étape de la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.

### 3.8.2.3. Contrôle avec série d'impulsions de consigne

Dans cette partie, nous allons choisir la consigne pour la température et l'humidité comme une série d'échelon unité .

Pour la température :

Temps= [0 200 200 400 400 600 600 800 800 1000] (min).

TC=[35 35 20 20 35 35 20 20 35 35](°C).

Pour l'humidité :

Temps= [0 200 200 400 400 600 600 800 800 1000] (min).

HC=[65 65 80 80 65 65 80 80 65 65](%).

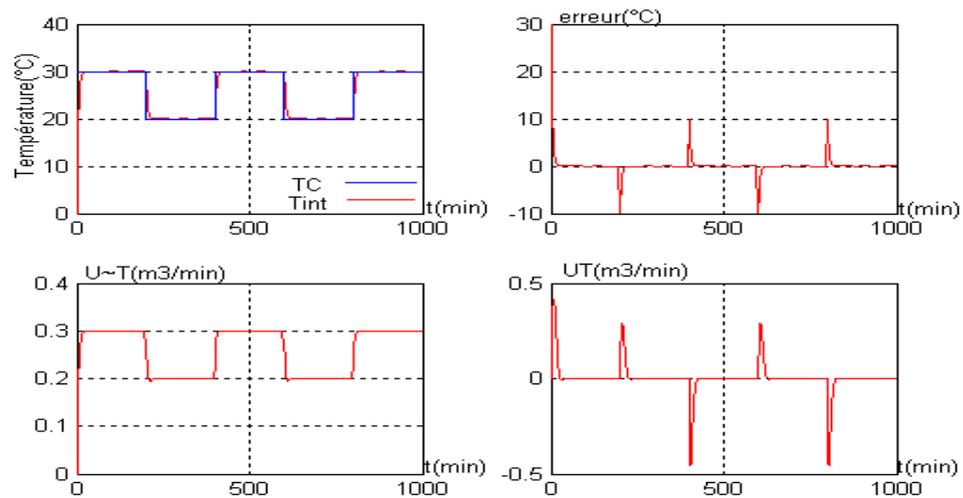


Figure 3.12: Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques fixes.

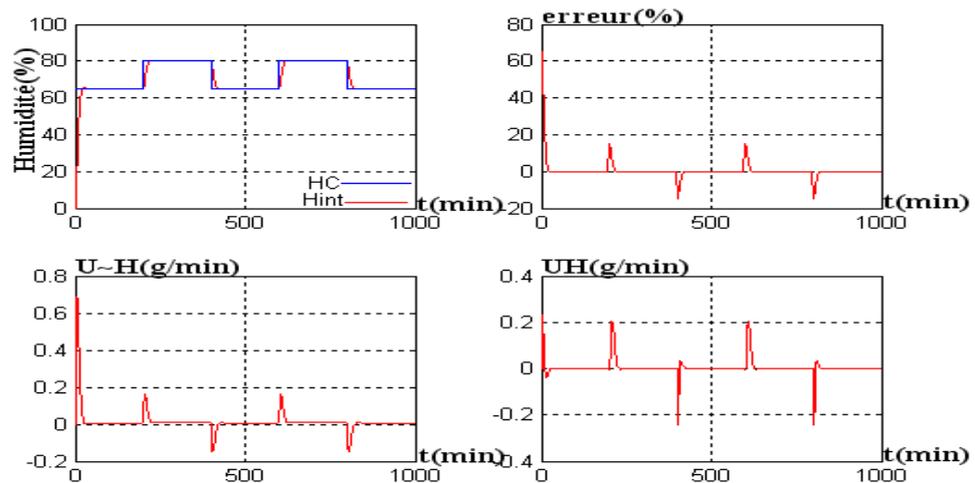


Figure 3.13: Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphérique fixes.

### 3.8.3. Deuxième teste avec changement des conditions extérieures

Cette fois, on testera nos contrôleurs avec base des données météorologique enregistrées par le central d'acquisition tunisienne, les consignes sont choisies comme une série d'échelon unité.

Pour la température :

Temps= [0 200 200 400 400 600 600 800 800 1000](min).

TC=[20 20 30 30 20 20 30 30 20 20](°C).

Pour l'humidité :

Temps= [0 200 200 400 400 600 600 800 800 1000](min).

HC=[60 60 75 75 60 60 75 75 60 60](%). R=700Lux

Base de donnée tunisienne au cours de deux journées 14 et 15/Février/1996 :

✓ Pour la température :

t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t(min)	T (°C)
0	25	550	18.1	850	25	1110	36.8
15	24.8	555	17	860	25.8	1125	36.9
30	24.5	570	18.1	870	25.1	1140	37.4
60	24.3	585	18.2	875	25.6	1155	37
75	24.3	600	18.4	880	25.7	1170	37.4
90	24.1	615	18	885	26.9	1180	37.8
105	23.6	630	19.2	890	27.3	1185	37.3
135	22.8	645	19.9	895	27.8	1190	37.1
165	22.6	660	19.7	900	29.1	1200	37.3
195	22.2	675	19.6	915	29.6	1215	36
225	21.7	690	19.9	930	30	1230	35.8
240	21.4	705	20.1	945	31.5	1245	35.9
270	21.1	720	20.3	960	32.5	1260	35
285	20	730	20.7	975	34.4	1275	34.8
300	20.7	735	20	990	35	1290	34.4
315	20.3	750	21.1	1005	35.4	1305	32.5
330	20.1	755	21.4	1020	35.8	1320	32.2
360	19.9	760	21.7	1040	35.9	1335	31.8
390	19.6	765	22.2	1050	36	1350	31.5
405	19.7	780	22.6	1065	36.2	1365	31.2
420	19.9	795	22.8	1080	36.4	1380	30
450	19.2	810	23.6	1090	36.2	1395	29
480	18	825	24.1	1095	36.7	1410	28
510	18.4	840	24.3	1100	36.3	1425	26
540	18.2	845	24.8	1105	36.5	1440	25

Tableau 3.1: Température tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996.

✓ Pour l'humidité :

Temps (min)	Humidité (%)						
0	80.8	330	78.9	790	64.1	1175	36.7
15	81.9	345	78.5	800	62.7	1180	36.8
30	82.8	360	78.1	810	61.3	1185	36.4
45	83.7	390	78.7	825	59.7	1190	35
60	84.2	420	79.2	840	59.1	1195	36.3
75	85.5	440	78.8	855	58.3	1200	36.2
90	86.7	460	78.5	870	57.7	1205	36.1
105	89.3	480	78.2	885	56.1	1210	36.7
120	90	510	78.8	900	54.8	1215	36.9
130	89.5	540	78.3	915	52.3	1220	37.1
140	89.7	565	78.4	930	48.1	1235	37.6
150	89.8	595	78.7	945	47.3	1250	37.7
175	89.1	630	78.8	960	45.8	1265	38.9
190	88.6	650	79.1	975	43.2	1280	40
205	88.1	675	79.5	990	40.9	1295	42.3
225	87.5	690	80	1020	39.3	1310	44.8
240	87.1	705	78.6	1035	39.4	1325	46.8
250	85.9	720	76.1	1055	39.2	1340	50.1
260	84.1	730	74.9	1070	39.1	1355	55.1
270	82.3	740	72.3	1090	38.4	1370	59.2
280	81.8	760	70.7	1100	38	1385	60.1
300	79.3	780	68.4	1130	37.7	1400	62.1
315	79.1	785	66.9	1160	37.1	1415	62.5

Tableau 3.2: Humidité tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996.

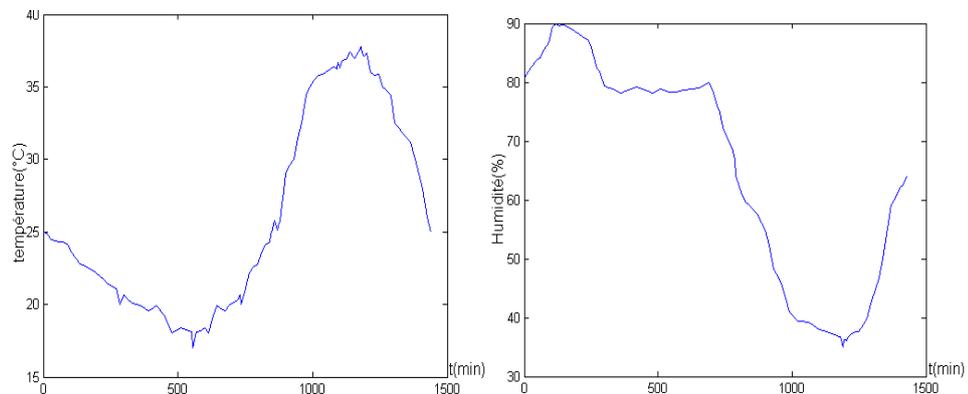


Figure 3.14: Evolution de température et humidité tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996.

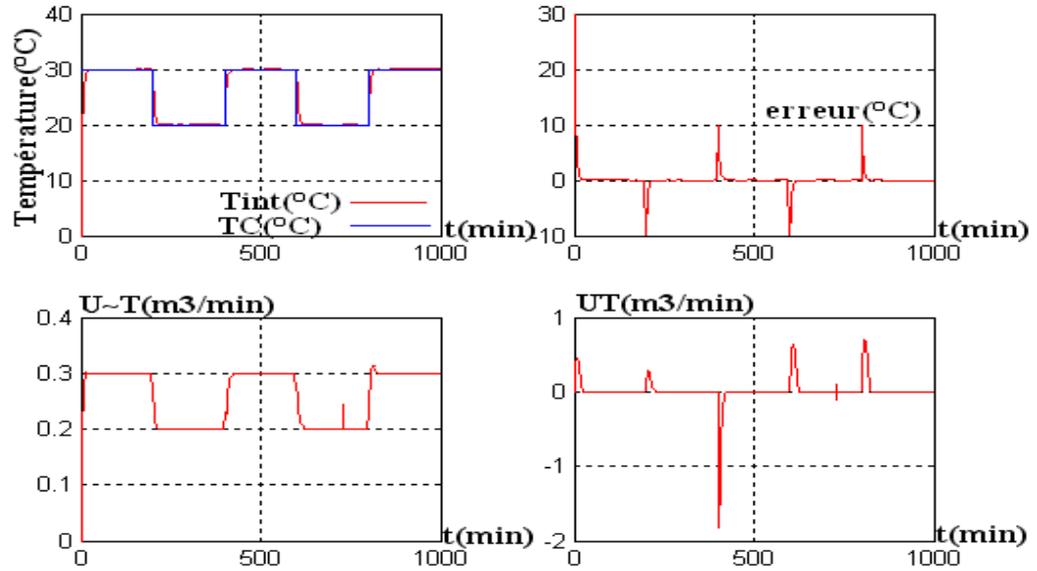


Figure 3.15: Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques tunisienne.

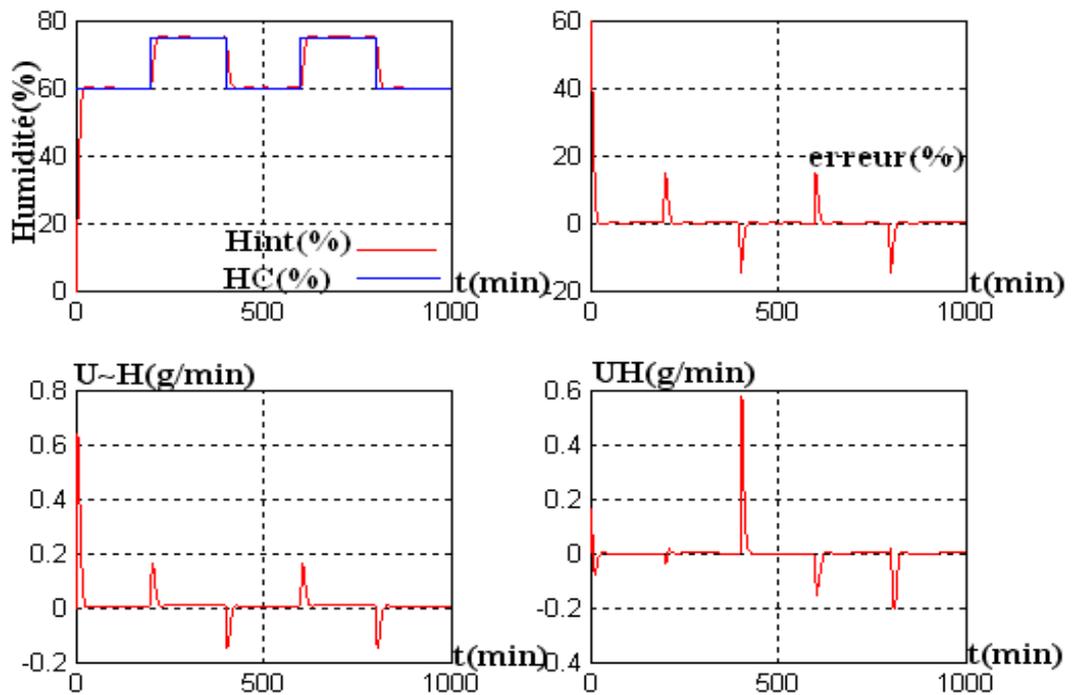


Figure 3.16: Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques tunisienne.

### 3.9. Interprétation

Pour chaque figure de notre simulation, on obtient des signaux de sortie très lents qui oscillent autour de la consigne désirée, plus la valeur de gain (KDT ou KDH) est grande plus la réponse du système est amortie, ainsi, le signal de sortie, converge vers la consigne désirée avec une erreur en régime permanent presque nulle. Et grâce à KIT et KIH la réponse de notre système devient rapide (le temps de réponse du système est petit).

Pour chaque teste, les résultats de simulation démontrent clairement que les commandes PD-OFT et PD-OFH ont été atteint et la réaction du système en boucle fermée est acceptable. La commande simultanée, de température et d'humidité d'une serre, a été simulée en utilisant des conditions atmosphériques proches du cas réel.

### 3.10. Régulation de la température et de l'humidité par contrôleur flou

#### 3.10.1. Introduction

Durant ces dernières années, la commande par logique floue est devenue un domaine de recherche très actif dans l'application de la théorie des ensembles flous, les travaux initiés par MANDANI dans le domaine de la commande par logique floue ont été motivé par les recherches du professeur L.A.ZADEH sur l'analyse des approches et des systèmes linguistiques, basées sur la théorie des ensembles flous.

La logique floue est une méthode appliquée dans des différents domaines de contrôle qui ont montré d'après les résultats obtenus, l'efficacité de cette approche à résoudre des problèmes complexes, l'idée de base de cette technique est l'imitation des aspects qualitatifs et approximatifs de la pensée humaine. [20] [2]

Ce chapitre est consacré à la présentation de la conception du contrôleur floue, puis on va utiliser ce contrôleur flou pour la régulation de la température et l'humidité d'une serre agricole.

#### 3.10.2. Contrôle de notre système

Pour la régulation de température et d'humidité, nous allons présenter deux types de réglages (réglage grossier et réglage fin).

### 3.10.3. Réglage grossier

#### 3.10.3.1. Régulation de température

- Définition des variables de commande

Pour réguler la température sous serre on a trois variables de commandes  $e$ ,  $T_{\text{ext}}$  et  $u$ .

- ✓  $e$  : c'est l'erreur qui représente la différence entre la consigne et la sortie réelle.
- ✓  $T_{\text{ext}}$  : c'est la température extérieure.
- ✓  $U$  : c'est la sortie qui représente la sortie réelle.

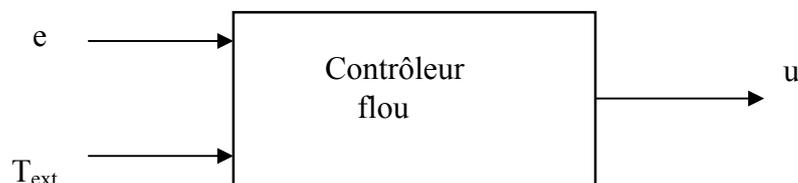


Figure 3.17 : Contrôleur flou du système de refroidissement pour un réglage grossier.

- Définition des variables linguistique

Dans ce type de réglage on divise l'univers de discours de chaque variable en trois sous ensembles flous, donc on aura les valeurs floues suivantes :

- ✓  $T(e) = \{N, EZ, P\}$  : Les sous ensembles flous associés à l'erreur sont :

$N$  : Négative,  $EZ$  : Environ de zéro,  $P$  : positif.

- ✓  $T(T_{\text{ext}}) = \{F, T, C\}$  : Les sous ensembles flous associés à la température extérieure sont :

$F$  : Froid,  $T$  : Tiède,  $C$  : Chaud.

- ✓  $T(u) = \{PC, AC, AL\}$  Les sous ensembles flous associés à la loi de commande sont :

$PC$  : Pas de commande,  $AC$  : Action courte,  $AL$  : Action longue.

- Définition des fonctions d'appartenances

La forme des fonctions d'appartenances est arbitraire intuitivement, Dans notre conception le choix des fonctions d'appartenances est basé sur le fait que la consigne est

égale 20°C pour la température sous serre.

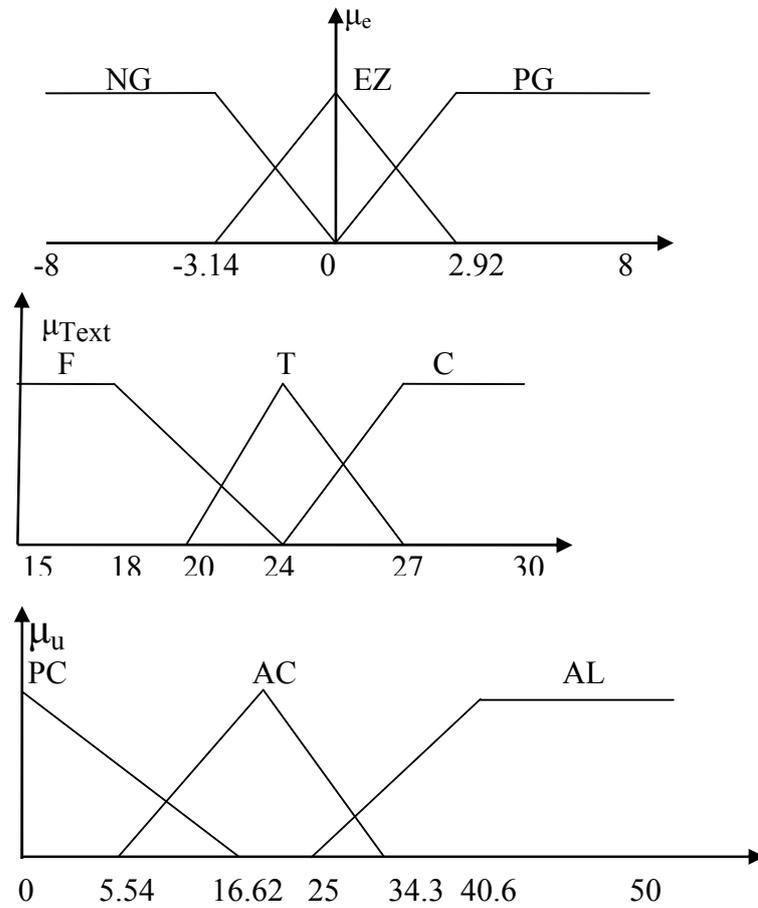


Figure 3.18 : Fonctions d'appartenances pour un réglage grossier de la température.

- Règles de contrôle

Le nombre de règles pour ce réglage est de l'ordre de 9. Comme indique le tableau suivant :

$T_{ext}$ e	F	T	C
NG	PC	PC	AC
EZ	PC	PC	PC
PG	PC	AC	AL

Tableau 3.3 : Table de décision pour un réglage grossier de la température

- Résultats de simulation :

- ❖ Régulation de température sans changement de consigne  $T=20^{\circ}\text{C}$

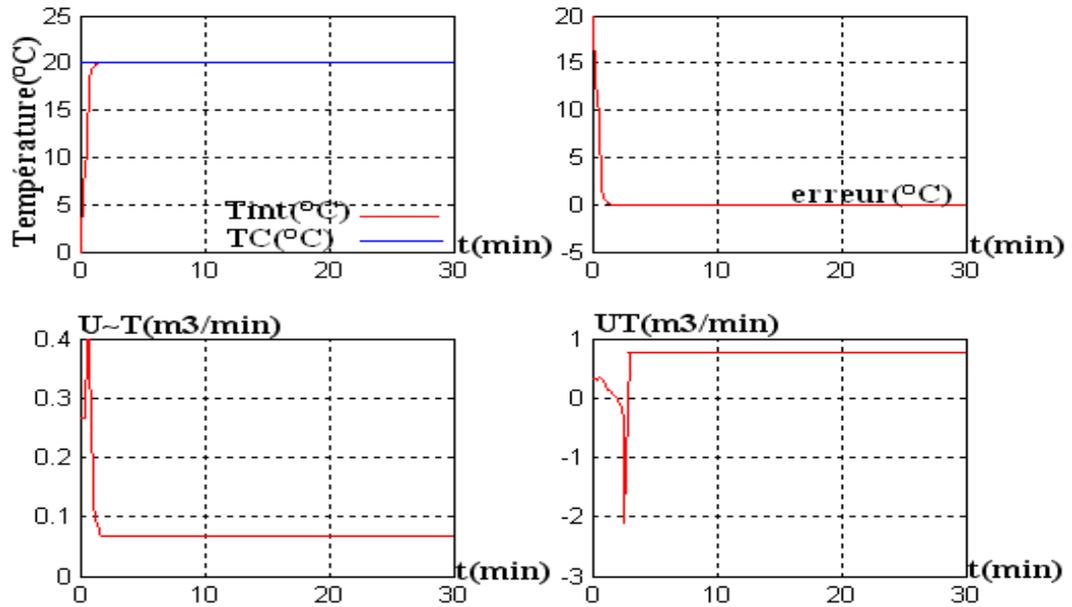


Figure 3.19 : Réglage grossier de température sans changement de consigne.

- ❖ Réglage de température avec changement de consigne

$t=[0\ 50\ 50\ 100]\text{(min)}$   $T_c=[30\ 30\ 20\ 20]\text{(}^{\circ}\text{C)}$

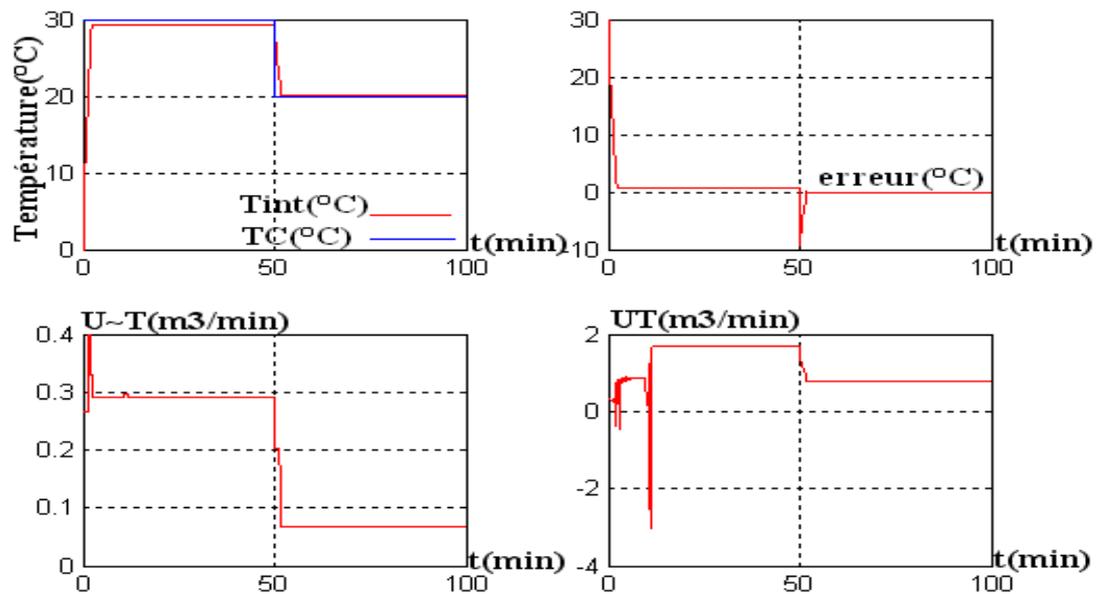


Figure 3.20 : Réglage grossier de température avec changement de consigne.

### 3.10.3.2. Régulation de l'humidité

- Définition des variables de commande

Dans cette partie, on s'intéresse à la détermination des variables de commande permettant la régulation de l'humidité sous serre. Dans notre conception on va considérer les variables de commande suivantes :

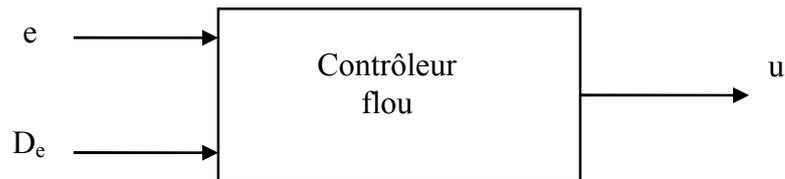


Figure 3.21 : Contrôleur flou du système d'humidification pour un réglage grossier de l'humidité.

- ✓ E : Erreur représente la différence entre une consigne prédéterminée et la sortie réelle.
- ✓  $D_e$  = dérivé d'erreur représente la variation de l'humidité entre deux périodes d'échantillonnage.
- ✓ U : Sortie commande, représente le temps d'action de la commande d'humidification

- Définition des variables linguistiques

Dans cette étape, on s'intéresse à la détermination des sous ensembles flous associés à des variables de commande des processus  $e$ ,  $D_e$  et  $u$ .

La variable linguistique est considérée comme étant l'élément clé dans la représentation des connaissances en raisonnement approximatif. elle peut prendre comme valeur des mots ou des phrases tirées du langage naturel ou artificiel. [2]

La variable linguistique associée à la variable de commande de l'erreur  $e$  est caractérisée par  $(e, T(e), X)$  avec :

- ✓  $X$  : est l'univers de discours. Dans notre cas on divise l'univers de discours de chaque variable en trois sous ensembles flous.
- ✓  $\mu(e) = \{NG, EZ, PG\}$  Sous ensemble flou associé à l'erreur sont : Négatif grand noté NG, environ de zéro noté EZ, et positif grand noté PG.

✓  $\mu(D_e) = \{NG, EZ, PG\}$  Sous ensemble flou associé à l'erreur sont négatif grand noté NG, environ de zéro noté EZ, positif grand noté PG.

✓  $\mu(u) = \{PC, AC, AL\}$ . Sous ensemble flou associé à la loi de commande sont :

Pas de commande noté PC, action courte noté AC, action long noté AL.

• Définition des fonctions d'appartenances

Après avoir présenté les sous ensembles flous liés aux différentes variables, on associe à chacun d'eux sa fonction d'appartenance. Une fonction d'appartenance peut prendre plusieurs formes, ainsi pour des raisons de faciliter le calcul et le représentation, les fonctions les plus utilisées sont des fonctions triangulaire et trapézoïdales.

Dans notre cas on a choisie la forme triangulaire comme indique la figure suivante :

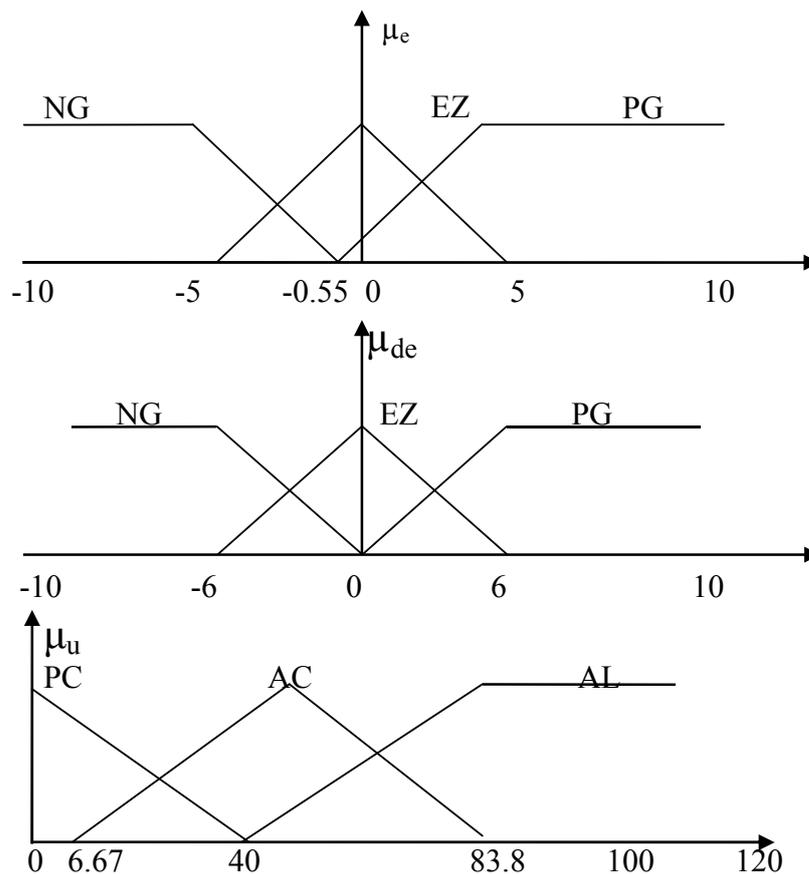


Figure.3.22 : Fonctions d'appartenances des sous ensembles flous de chaque variable linguistique (e,  $D_e$ , u) de contrôle d'humidité.

Pour garder une zone de réglage d'humidité entre 60% et 70%, il faut considéré l'écart est nul lorsqu'il est entre -5 et 5.

- Règle de contrôle flou

Le nombre de règles pour ce réglage est de l'ordre de 9. Comme indique le tableau suivant :

$\begin{matrix} & D_e \\ e & \end{matrix}$	NG	EZ	PG
NG	PC	AC	AL
EZ	PC	AL	AC
PG	AL	AL	AL

Tableau 3.4 : Matrice d'appartenance pour un réglage grossier d'humidité.

- Résultats de simulation

- ❖ Régulation sans changement de consigne  $H=75\%$

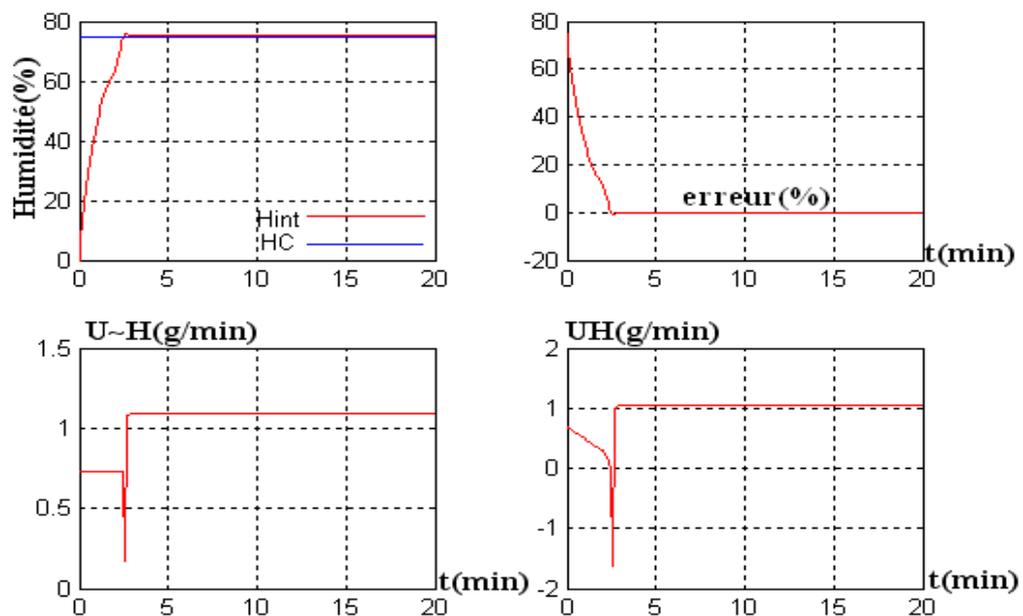


Figure 3.23 : Régulation grossier d'humidité sans changement de consigne.

- ❖ Régulation avec changement de consigne

$T=[0 \ 20 \ 20 \ 40](\text{min})$   $HC=[60 \ 75](\%)$

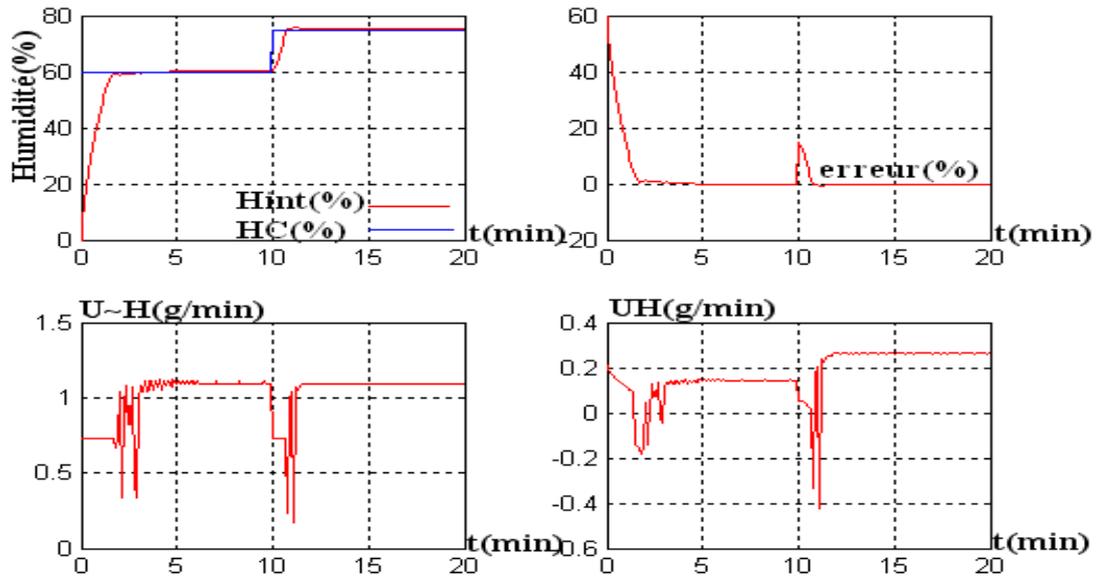


Figure 3.24 : Réglage grossier d'humidité avec changement de consigne.

#### 3.10.4. Réglage fin :

##### 3.10.4.1. Régulation de température

- définition des variables de commande

Pour réguler la température sous serre on a trois variables de commandes  $e$ ,  $T_{\text{ext}}$ ,  $u$ .

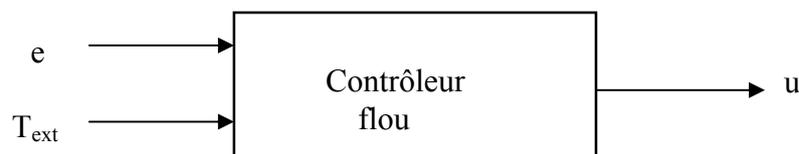


Figure 3.25 : Contrôleur flou du système de refroidissement pour un réglage fin.

- ✓  $e$  : c'est l'erreur qui représente la différence entre la consigne et la sortie réelle.
- ✓  $T_{\text{ext}}$  : c'est la température extérieure.
- ✓  $U$  : c'est la sortie qui représente la sortie réelle (c'est le temps d'action de la commande de refroidissement ou chauffage).

- Définition des variables linguistiques

Les variables de commande du processus  $e$ ,  $T_{\text{ext}}$ ,  $u$  sont des grandeurs physiques dont

chacun associe un ensemble de terme linguistiques, elles sont définies comme suit :

✓  $T(e) = \{GN, NP, EZ, PP, GP\}$ . Les sous ensembles flous associés à l'erreur sont:

GN : Grand Négatives.

NP : Négatives petit.

EZ : Environ de zéro.

PP : Positives petit.

PG : Positives grand.

✓  $T(T_{ext}) = \{TF, F, PF, T, PC, C, TC\}$  Les sous ensembles flous associés température extérieure sont :

TF : Très froid.

F : Froid.

PF : Peu froid.

T : Tiède.

PC : Peu chaud.

C : chaud.

TC : Très chaud.

✓  $T(u) = \{PC, AC, AL\}$  Les sous ensembles flous associés à la loi de commande sont :

PC : Pas de commande.

AC : Action courte.

AL : Action longue.

- Univers de discours

Les trois univers de discours affectés aux trois variables de notre régulateur, à savoir  $e$ ,  $T_{ext}$ ,  $u$ . ont été fixés comme suit :

$U_d_e : [-8, 8]. (^{\circ}C)$

$U_d_{T_{ext}} : [-10, 36]. (^{\circ}C)$

$U_d : [0, 43]$

$U_e$  : Univers de discours de l'erreur e.

$U_{Tex}$  : Univers de discours de température extérieure.

$U_u$  : Univers de discours de la commande.

- Fonctions d'appartenances

Dans les applications de la logique floue, les fonctions d'appartenances sont associées avec les termes qui apparaissent dans les antécédents ou les conséquents des règles.

Dans notre cas, on utilise les fonctions d'appartenances de formes triangulaires et trapézoïdales comme indique la figure 3.26.

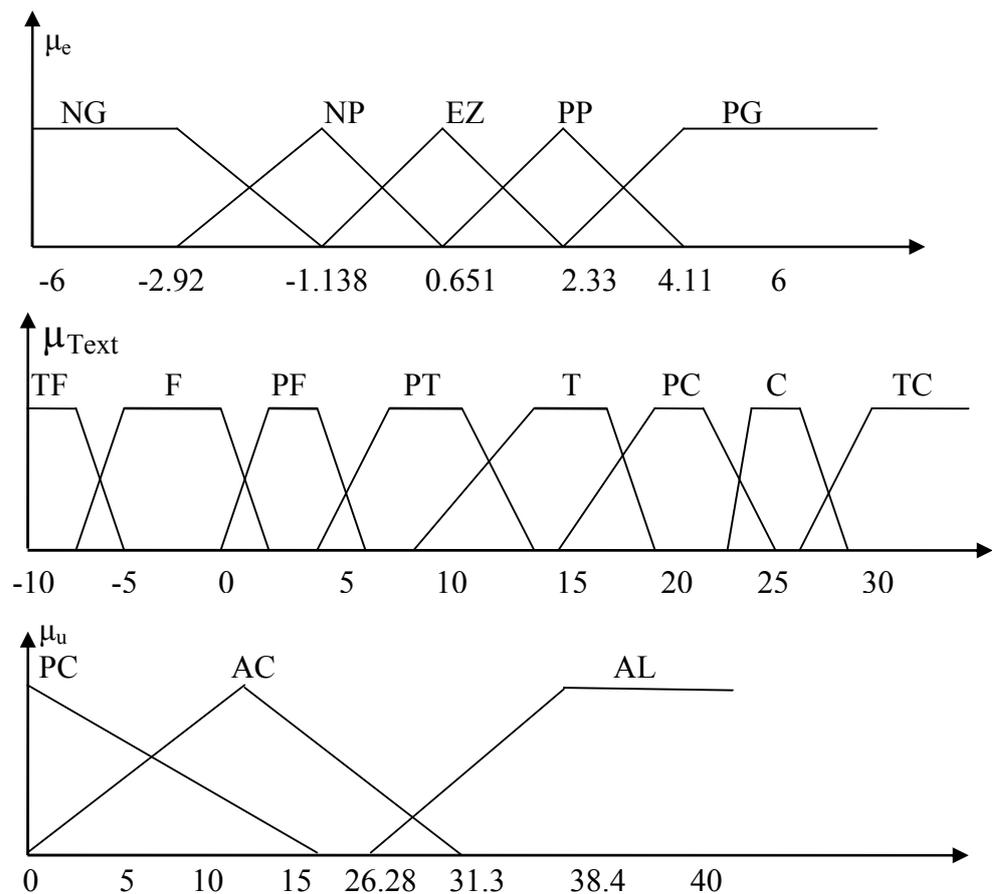


Figure 3.26 : Fonction d'appartenance de température.

- Matrice d'appartenance :

Le nombre de règles pour ce réglage est de l'ordre de 40 règles, comme indique le tableau suivant :

$T_{\text{extr}}$ e	TF	F	PF	PT	T	PC	C	TC
NG	PC	AC						
NP	PC	PC	PC	PC	PC	AC	AC	AC
EZ	PC	PC	PC	PC	AC	AC	AC	AL
PP	PC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AL
PG	PC	AC	AC	AC	AC	AC	AL	AL

Tableau 3.5 : Matrice d'appartenance pour un réglage fin de la température.

- Résultats de simulation

- ❖ Régulation sans changement de consigne  $TC=20^{\circ}\text{C}$

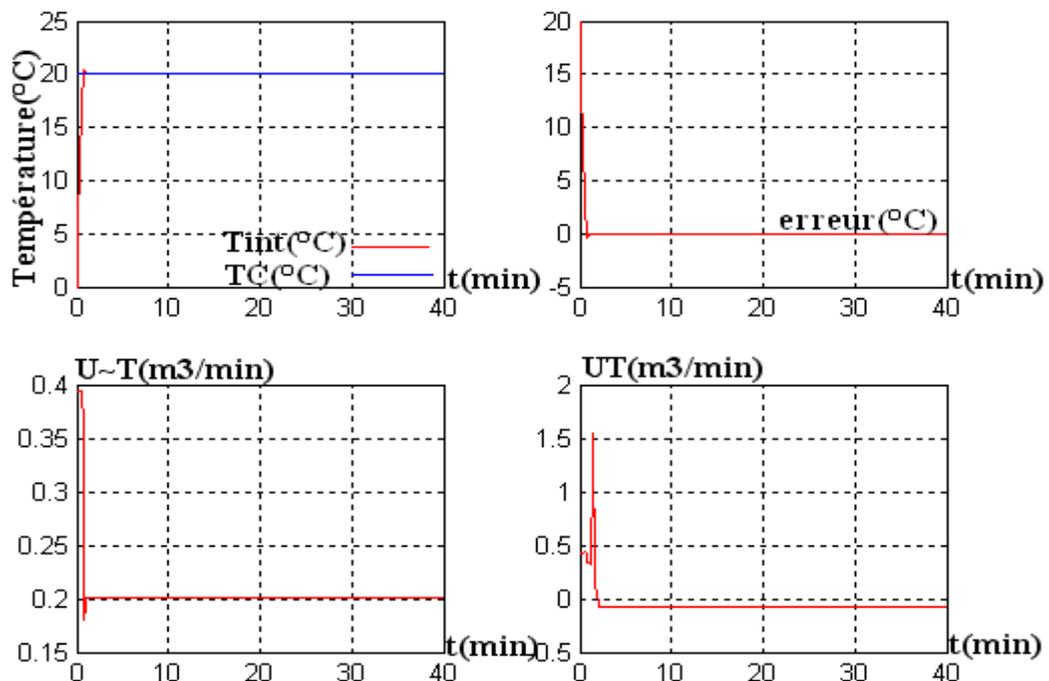


Figure 3.27 : Réglage fin de température sans changement de consigne.

❖ Régulation avec changement de consigne :

$t=[0 \ 25 \ 25 \ 40]$  (min)  $TC=[30 \ 30 \ 20 \ 20]$  ( $^{\circ}C$ )

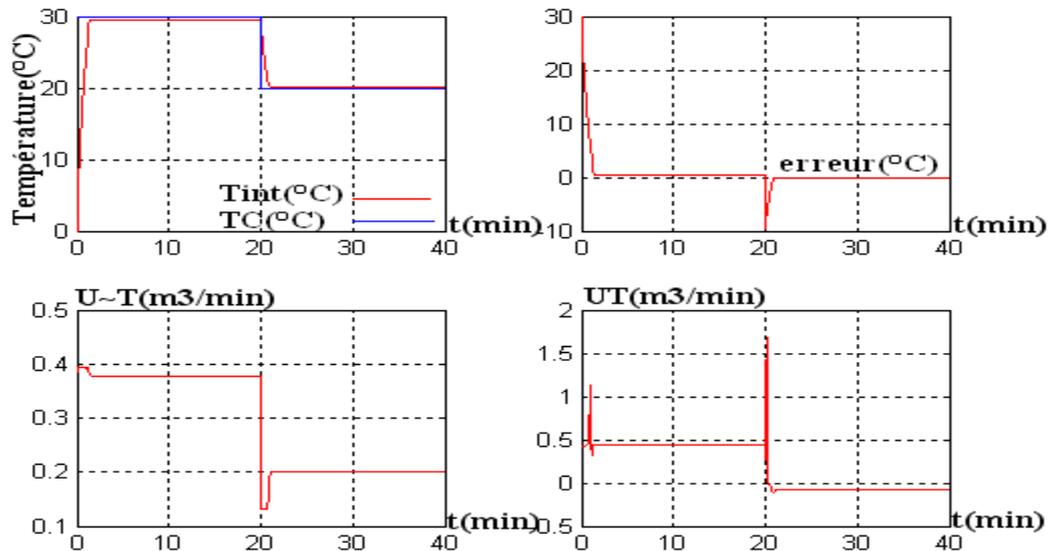


Figure 3.28 : Réglage fin de température avec changement de consigne.

### 3.10.4.2. Régulation d'humidité

- définition des variables de commande

Pour réguler l'humidité sous serre on a trois variables de commandes  $e$ ,  $H_{\text{ext}}$ ,  $u$ .

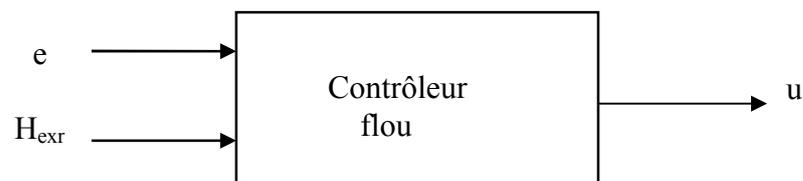


Figure 3.29 : Contrôleur flou du système d'humidification.  
Pour un réglage fin.

- Définition des variables linguistiques

Les variables de commande du processus  $e$ ,  $H_{\text{ext}}$ ,  $u$  sont des grandeurs physiques dont chacun associe un ensemble de terme linguistiques, elles sont définit comme suit :

✓  $T(e) = \{GN, NP, EZ, PP, GP\}$ .

Les sous ensembles flous associés à l'erreur sont:

GN : Négatives grand.

NP : Négatives petit.

EZ : Environ de zéro.

PP : Positives petit.

PG : Positives grand.

✓  $T(\text{Hext}) = \{\text{TS}, \text{S}, \text{PS}, \text{HA}, \text{PH}, \text{H}, \text{TH}\}$  Les sous ensembles flous associés à l'humidité extérieure sont :

TS : Très sec.

S: Sec.

PS: Sec.

HA: Humidité acceptable.

PH: Peu humide.

H: Humide.

TH: Très humide.

✓  $T(u) = \{\text{PC}, \text{AC}, \text{AL}\}$  Les sous ensembles flous associés à la loi de commande sont :

PC : Pas de commande.

AC : Action courte.

AL : Action longue.

- Univers de discours

Les trois univers de discours affectés aux trois variables de notre régulateur, à savoir  $e$ ,  $\text{Hext}$ ,  $u$ . ont été fixés comme suit :

$U_{d_e} : [-8, 8]. (^{\circ}\text{C})$

$U_{d_{\text{Hext}}} : [0, 100]. (^{\circ}\text{C})$

$U_{d_u} : [0, 155]$

$U_d_e$  : Univers de discours de l'erreur e.

$U_{d_{Tex}}$  : Univers de discours d'humidité extérieure.

$U_d_u$  : Univers de discours de la commande.

- Fonctions d'appartenances

Dans notre cas, on utilise les fonctions d'appartenances de formes triangulaires et trapézoïdales comme indique la figure 3.30.

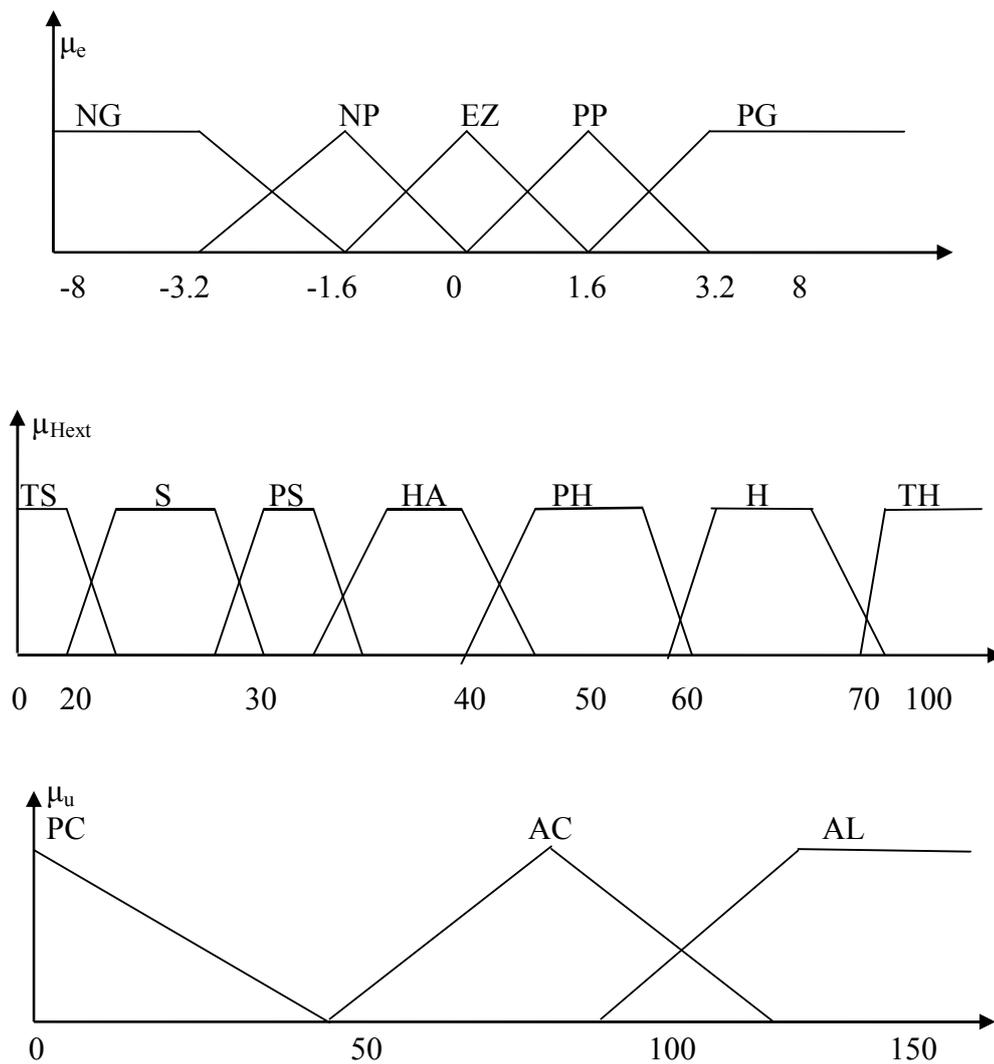


Figure 3.30 : Fonction d'appartenance d'humidité.

- Matrice d'appartenance :

e \ Hext	TS	S	PS	HA	PH	H	TH
NG	PC						
NP	PC						
EZ	AC	AC	AC	AC	PC	PC	AC
PP	AC	AC	AC	AC	PC	PC	AL
PG	AL						

Tableau 3.6 : Matrice d'appartenance pour un réglage fin d'humidité

- Résultats de simulation

- ❖ Régulation sans changement de consigne HC=75%

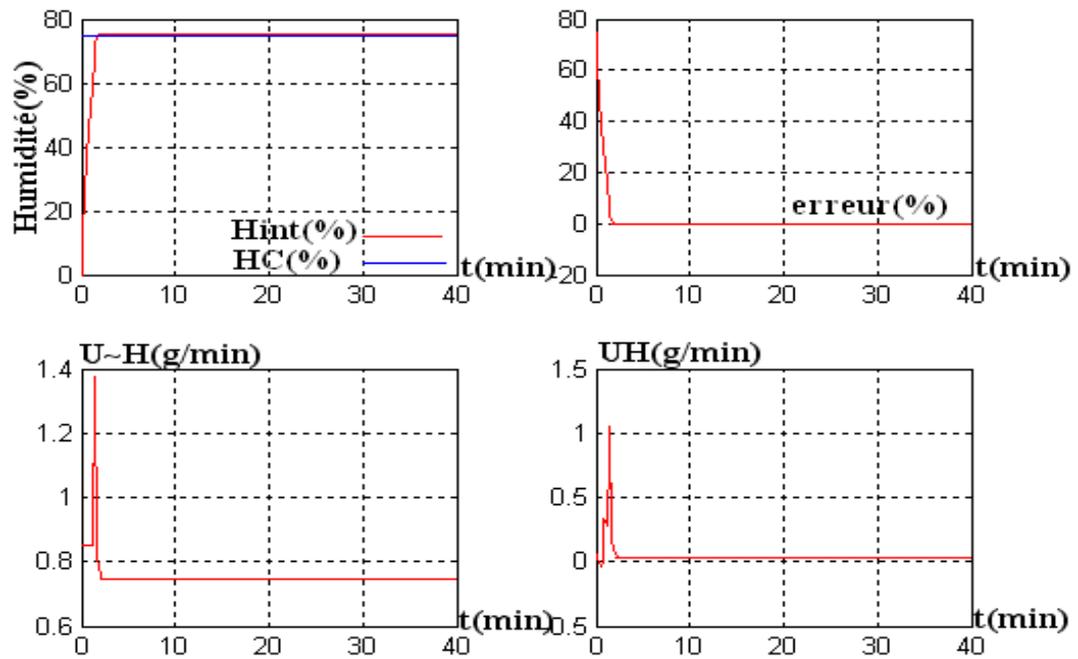


Figure 3.31 : Réglage fin d'humidité sans changement de consigne.

- ❖ Régulation avec changement de consigne

$t=[0 \ 20 \ 20 \ 40](\text{min})$

$HC=[60 \ 75](\%)$

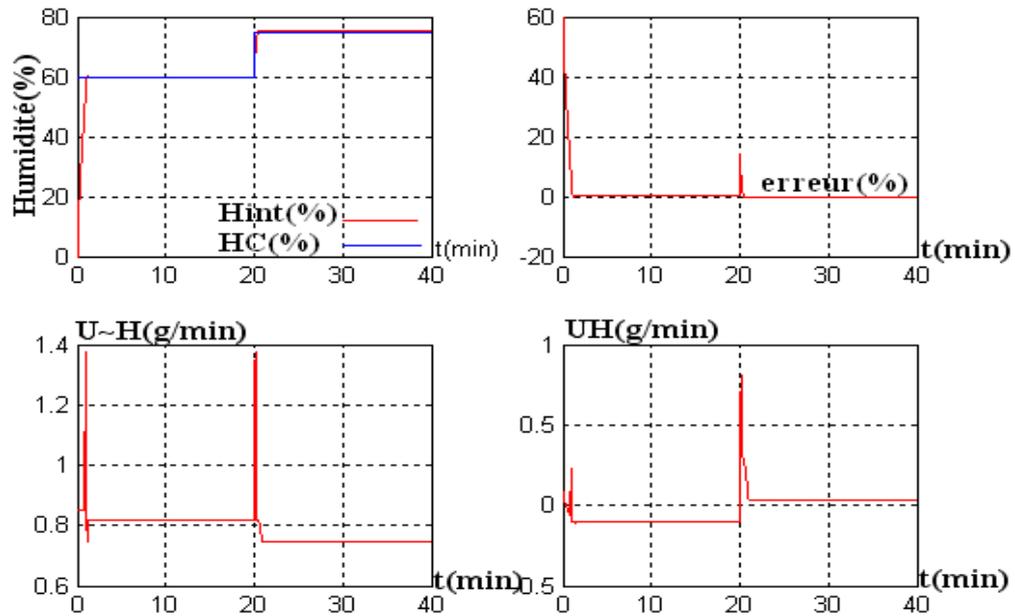


Figure 3.32 : Réglage fin d'humidité avec changement de consigne.

### 3.11. Interprétation

Notre simulation de la serre par logique floue, nous a permis de fixer deux seuils un pour la température et le deuxième pour l'humidité.

Dans notre exemple, nous avons choisie comme consigne pour la température, de 20°C et pour l'humidité de, 75% avec les conditions extérieurs fixes :  $T_{ext}=32^{\circ}\text{C}$ ,  $H_{ext}=82\%$  et  $R=700\text{Lux}$ .

Pour chaque figure, nous avons remarqué que les sorties ( $T_{int}$  et  $H_{int}$ ) suivent très bien la consigne désirée avec l'erreur en régime permanent nulle. Mais malheureusement ces contrôleurs ne répondent pas au changement des perturbations extérieures. Avec les même conditions extérieures le temps de réponse trouvé est comme suit :

#### ➤ Réglage grossier

Le temps de réponse pour la température  $t_T=5.6\text{min}$ .

Le temps de réponse pour l'humidité  $t_H=3.2\text{min}$ .

#### ➤ Réglage fin

Le temps de réponse pour la température  $t_T=1.5\text{min}$ .

Le temps de réponse pour l'humidité  $t_H=2.5\text{min}$ .

Avec le régulateur PDOF, nous avons trouvé le temps de réponse pour la température  $t_T=30\text{min}$  et l'humidité  $t_H=38\text{min}$ .

Les résultats démontrent clairement que la rapidité du système avec le contrôleur flou est meilleure que celui du régulateur PDOF.

### 3.12. Conclusion

Les résultats de simulation en boucle fermée sont positifs étant donné qu'on a pu concevoir les deux régulateurs flous de commande qui gèrent la régulation de température et d'humidité de notre système avec une bonne précision.

Ces résultats sont obtenus après avoir fait des modifications sur la forme, la distribution des fonctions d'appartenance et les règles d'inférence.

Les simulations suggèrent que le système de commande résultant soit robuste, stable, et répond convenablement aux perturbations extérieures.

## CONCLUSION

Suivant les indications des agronomes dans la culture des plantes, les conditions de l'environnement incluent le besoin de protection contre les extrémités de la température, l'humidité et le rayonnement solaire.

Le travail présenté dans ce mémoire étant le contrôle du climat à l'intérieure d'une serre.

En première étape, nous avons établi le modèle mathématique de la serre, ce dernier est basé sur le concept du bilan énergétique dont sa nature étant non linéaire et fortement couplée. La méthode de découplage et de linéarisation présentée dans notre mémoire c'est montré très efficace pour la commande du climat interne de la serre, en commandant la température et l'humidité qui représentent les principaux paramètres climatiques pour l'optimisation des cultures, ces derniers sont mesurés par un thermomètre et hygromètre qui habituellement sont situés à une certaine distance des ventilateurs et des systèmes des humidificateurs, l'effets de ces derniers présentent un temps de retard, par conséquent les changements de température et humidité sont déterminés après certains délais ( $d_T$ ) et ( $d_H$ ) respectivement.

Cependant, pour rendre notre système linéaire et découplé nous utiliserons des contrôleurs Feedback et Feedforward a la loi de commande, ceci sera réalisé en prenant des mesures des états présents de température, d'humidité et des perturbations, tout en sachant que le délai peut affecter le procédé de linéarisation Feedback et Feedforward en dégradant son exécution. Pour éviter ce problème, nous avons choisi  $\tau_T > 4d_T$  et  $\tau_H > 4d_H$  qui sont liés à la vitesse de la réaction du système en boucle fermée, dans ce cas les résultats se sont montrés très satisfaisants entre la réaction de notre système et l'exécution de Feedback et Feedforward.

Dans la deuxième étape, on a vu plusieurs types de commandes de régulation et dont les principaux sont :

- Commande par le contrôleur PDOF.
- Commande par le contrôleur flou.

Plusieurs simulations ont été testées, pour voir l'efficacité de ces contrôleurs. Nous avons simulé notre système en appliquant différentes variations sur ces perturbations et la consigne.

- La simulation par le contrôleur PDOF, permet de supposer que ce type de commande donne des résultats intéressants du point de vue du contrôle des signaux de sortie qui suivent les signaux de consigne avec une erreur en régime permanent pratiquement nulle. Ce qui laisse présumer que la réaction du système en boucle fermée reste tolérable car répondant convenablement aux signaux de consignes et ce quelque soit les perturbations externes.

Cependant l'inconvénient majeure de ce type de contrôleur, vient des réponses très lentes qu'il produit (réponses pouvant atteindre des durées allant de 30 à 40 min) pour réguler la température et l'humidité.

- Les résultats obtenus grâce au contrôleur flou dans l'exemple étudié sont prometteurs puisqu'il solutionne le problème de rapidité en terme de temps de réponse allant de 2 à 3 min pour réguler convenablement la température et l'humidité.

Son inconvénient réside dans sa mauvaise réponse aux changements qu'introduisent les perturbations par rapport aux signaux de consigne

- Les commandes, obtenues par ces deux types de contrôleurs sont sans action intégrale (ces régulateurs ne génèrent pas des signaux de commandes qui présentent des amplitudes plus importantes en fonction de la consigne).

Comme perspective à notre travail, nous proposons de faire une réalisation de ces contrôleurs sur le terrain sous serre, dans ce cas on sera devant un système très complexe.

**APPENDICE A**  
**LISTE DES SIMBOLES ET DES ABREVIATIONS**

PID	: Le contrôleur (proportionnelle intégrale dérivée).
PDF	: Le contrôleur (pseudo derivative feedback controller).
IDF	: Integral control with derivative feedback.
PD0F	: Pseudo derive zero feedback.
KI, KD	: Le coefficient d'intégral et dérivé.
$X_T, X_H$	: Les variables d'états de la température et de l'humidité.
$U_T, U_H$	: Les commandes de ventilateur et de système du brouillard.
$C_p$	: La chaleur spécifique.
UA	: Le coefficient de transfert chaleur.
$\rho$	: La densité de l'air.
V	: Le volume de la serre.
$d_T, d_H$	: Le retard de détermination du changement $T_{int}$ et $H_{int}$ .
$G_T, G_H$	: La fonction de transfert de la température et de l'humidité.
$\tilde{U}_T, \tilde{U}_H$	: La nouvelle commande de la température et l'humidité.
$\xi_T, \xi_H$	: Le coefficient d'amortissement de la température et de l'humidité.
Ai	: L'air intérieur.
Ae	: L'air extérieur.
S	: Le sol.
C	: La couverture.
PL	: La plante.
Br	: Le système du brouillard.
Ch	: Le système du chauffage.
$T_{int}$	: La température intérieure.
$H_{int}$	: L'humidité intérieure.
$T_{ext}$	: La température extérieure.
$H_{ext}$	: L'humidité extérieure.
t	: Le temps.
T	: La période d'oscillation.

$W$	: La pulsation des oscillations.
$T_s(0)$	: La température moyenne du sol.
$a_n, b_n$	: Les coefficients d'ordre $n$ de composition de fourier.
$a$	: La diffusivité du sol.
$T_s(x, t)$	: La température du sol en fonction du profondeur et le temps.
$x$	: Le profondeur.
$T_{s1}(x, t)$	: La température de la première couche du sol.
$T_{s2}(x, t)$	: La température de la deuxième couche du sol.
$N_{PL}$	: Le nombre des plantes.
$M_{PL}$	: La masse des plantes.
$\lambda$	: La chaleur latente de évaporation.
$K_e$	: Le coefficient d'évaporation.
$V_{air}$	: La vitesse de l'air.
$V_{v, t}$	: Le taux de ventilation total.
$V_{v, m}$	: Le taux de ventilation mesuré.
$V_{v, f}$	: Le taux de ventilation des fissures.
$Q_C$	: La chaleur produite par la couverture.
$R=Q_s$	: La chaleur produite par le soleil.
$A_f$	: La surface du sol.
$S_i$	: Le rayonnement solaire.
$LAI$	: L'indice foliaire.
$H_{tot}$	: L'humidité totale.
$E(R, H_{int})$	: Le taux d'évapotranspiration des plantes.
$AMV$	: Le mélange du volume actif.
$EVH$	: Le volume efficace de l'humidité.

**APPENDICE B**  
**THEORIE SUR LA CHALEUR SPECIFIQUE ET LA DENSITE DE L’AIR**

Chaleur spécifique

Les détails des propriétés physiques d'air et d'eau peuvent être trouvées dans le tableau ci dessous :

Fluide	Chaleur spécifique	Masse volumique
Eau	4217 J/kg·°C	998 kg/m <sup>3</sup>
Air	1060 J/kg·°C	1.2 kg/m <sup>3</sup>

Tableau B-1: Masse volumique chaleur spécifique d'un fluide

On peut à présent comparer les capacités d'évacuation de puissance en utilisant l'équation thermique suivante :

Élévation de la température d'un fluide = puissance à dissiper / (chaleur spécifique \* masse volumique \* débit volumique)

Masse volumique (kg/m<sup>3</sup> d'air humide)

C'est la masse d'un m<sup>3</sup> d'air humide. La pression du mélange (air sec+vapeur d'eau) est égale à la somme des pressions q'aurait chacun des constituants s'il était seul à occuper le volume de l'ensemble. Donc dans un m<sup>3</sup> d'air humide, on retrouvera la somme de masse constituants, c'est la somme des masses volumiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, aux pressions partielles et température désignées.

Masse volumique de l'air sous 1013 mbar

Ts = Température sèche en °C

Hr = Humidité relative

Ts	100% Hr	90% Hr	80% Hr	70% Hr	60% Hr	50% Hr	40% Hr	30% Hr	20% Hr	10% Hr
-10 °C	1,34	1,34	1,34	1,34	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341
-9 °C	1,335	1,335	1,335	1,335	1,335	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336
-8 °C	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,331	1,331	1,331	1,331
-7 °C	1,324	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325	1,326	1,326	1,326	1,326
-6 °C	1,319	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,321	1,321	1,321	1,321
-5 °C	1,314	1,314	1,315	1,315	1,315	1,315	1,316	1,316	1,316	1,316
-4 °C	1,309	1,309	1,31	1,31	1,31	1,31	1,311	1,311	1,311	1,311
-3 °C	1,304	1,304	1,305	1,305	1,305	1,305	1,306	1,306	1,306	1,306
-2 °C	1,299	1,299	1,3	1,3	1,3	1,301	1,301	1,301	1,301	1,302
-1 °C	1,294	1,295	1,295	1,295	1,295	1,296	1,296	1,296	1,296	1,297
0 °C	1,289	1,29	1,29	1,29	1,29	1,291	1,291	1,291	1,292	1,292
1 °C	1,284	1,285	1,285	1,285	1,286	1,286	1,286	1,287	1,287	1,287
2 °C	1,279	1,28	1,28	1,281	1,281	1,281	1,282	1,282	1,282	1,283
3 °C	1,275	1,275	1,275	1,276	1,276	1,276	1,277	1,277	1,277	1,278
4 °C	1,27	1,27	1,271	1,271	1,271	1,272	1,272	1,272	1,273	1,273
5 °C	1,265	1,265	1,266	1,266	1,267	1,267	1,267	1,268	1,268	1,269
6 °C	1,26	1,261	1,261	1,261	1,262	1,262	1,263	1,263	1,264	1,264
7 °C	1,255	1,256	1,256	1,257	1,257	1,258	1,258	1,259	1,259	1,26
8 °C	1,25	1,251	1,251	1,252	1,252	1,253	1,253	1,254	1,254	1,255
9 °C	1,246	1,246	1,247	1,247	1,248	1,248	1,249	1,249	1,25	1,251
10 °C	1,241	1,241	1,242	1,243	1,243	1,244	1,244	1,245	1,245	1,246
11 °C	1,236	1,237	1,237	1,238	1,239	1,239	1,24	1,24	1,241	1,242
12 °C	1,231	1,232	1,233	1,233	1,234	1,235	1,235	1,236	1,237	1,237
13 °C	1,227	1,227	1,228	1,229	1,229	1,23	1,231	1,231	1,232	1,233
14 °C	1,222	1,223	1,223	1,224	1,225	1,226	1,226	1,227	1,228	1,229
15 °C	1,217	1,218	1,219	1,22	1,22	1,221	1,222	1,223	1,223	1,224
16 °C	1,212	1,213	1,214	1,215	1,216	1,217	1,217	1,218	1,219	1,22
17 °C	1,208	1,209	1,21	1,21	1,211	1,212	1,213	1,214	1,215	1,216
18 °C	1,203	1,204	1,205	1,206	1,207	1,208	1,209	1,21	1,211	1,211
19 °C	1,198	1,199	1,2	1,201	1,202	1,203	1,204	1,205	1,206	1,207
20 °C	1,194	1,195	1,196	1,197	1,198	1,199	1,2	1,201	1,202	1,203
21 °C	1,189	1,19	1,191	1,192	1,193	1,194	1,196	1,197	1,198	1,199
22 °C	1,184	1,185	1,187	1,188	1,189	1,19	1,191	1,192	1,194	1,195
23 °C	1,179	1,181	1,182	1,183	1,184	1,186	1,187	1,188	1,189	1,191
24 °C	1,175	1,176	1,177	1,179	1,18	1,181	1,183	1,184	1,185	1,187
25 °C	1,17	1,171	1,173	1,174	1,176	1,177	1,178	1,18	1,181	1,183
26 °C	1,165	1,167	1,168	1,17	1,171	1,173	1,174	1,176	1,177	1,178
27 °C	1,16	1,162	1,164	1,165	1,167	1,168	1,17	1,171	1,173	1,174
28 °C	1,156	1,157	1,159	1,161	1,162	1,164	1,165	1,167	1,169	1,17
29 °C	1,151	1,153	1,154	1,156	1,158	1,16	1,161	1,163	1,165	1,166
30 °C	1,146	1,148	1,15	1,151	1,153	1,155	1,157	1,159	1,161	1,163
31 °C	1,141	1,143	1,145	1,147	1,149	1,151	1,153	1,155	1,157	1,159
32 °C	1,136	1,138	1,14	1,142	1,144	1,146	1,149	1,151	1,153	1,155
33 °C	1,131	1,133	1,136	1,138	1,14	1,142	1,144	1,146	1,149	1,151
34 °C	1,126	1,129	1,131	1,133	1,136	1,138	1,14	1,142	1,145	1,147
35 °C	1,121	1,124	1,126	1,129	1,131	1,133	1,136	1,138	1,141	1,143
36 °C	1,116	1,119	1,122	1,124	1,127	1,129	1,132	1,134	1,137	1,139
37 °C	1,111	1,114	1,117	1,119	1,122	1,125	1,127	1,13	1,133	1,135
38 °C	1,106	1,109	1,112	1,115	1,118	1,12	1,123	1,126	1,129	1,132

39 °C	1,101	1,104	1,107	1,11	1,113	1,116	1,119	1,122	1,125	1,128
40 °C	1,096	1,099	1,102	1,105	1,109	1,112	1,115	1,118	1,121	1,124
41 °C	1,091	1,094	1,098	1,101	1,104	1,107	1,111	1,114	1,117	1,12
42 °C	1,086	1,089	1,093	1,096	1,099	1,103	1,106	1,11	1,113	1,117
43 °C	1,081	1,084	1,088	1,091	1,095	1,099	1,102	1,106	1,109	1,113
44 °C	1,075	1,079	1,083	1,087	1,09	1,094	1,098	1,102	1,105	1,109
45 °C	1,07	1,074	1,078	1,082	1,086	1,09	1,094	1,098	1,102	1,106
46 °C	1,064	1,069	1,073	1,077	1,081	1,085	1,089	1,094	1,098	1,102
47 °C	1,059	1,063	1,068	1,072	1,076	1,081	1,085	1,089	1,094	1,098
48 °C	1,053	1,058	1,063	1,067	1,072	1,076	1,081	1,085	1,09	1,095
49 °C	1,048	1,053	1,057	1,062	1,067	1,072	1,077	1,081	1,086	1,091
50 °C	1,042	1,047	1,052	1,057	1,062	1,067	1,072	1,077	1,082	1,087
51 °C	1,036	1,042	1,047	1,052	1,057	1,063	1,068	1,073	1,078	1,084
52 °C	1,03	1,036	1,041	1,047	1,053	1,058	1,064	1,069	1,075	1,08
53 °C	1,025	1,03	1,036	1,042	1,048	1,053	1,059	1,065	1,071	1,076
54 °C	1,019	1,025	1,031	1,037	1,043	1,049	1,055	1,061	1,067	1,073
55 °C	1,012	1,019	1,025	1,031	1,038	1,044	1,05	1,057	1,063	1,069
56 °C	1,006	1,013	1,02	1,026	1,033	1,039	1,046	1,053	1,059	1,066
57 °C	1	1,007	1,014	1,021	1,028	1,035	1,042	1,048	1,055	1,062
58 °C	0,994	1,001	1,008	1,015	1,023	1,03	1,037	1,044	1,051	1,059
59 °C	0,987	0,995	1,002	1,01	1,017	1,025	1,033	1,04	1,048	1,055
60 °C	0,981	0,989	0,997	1,004	1,012	1,02	1,028	1,036	1,044	1,052
61 °C	0,974	0,982	0,991	0,999	1,007	1,015	1,023	1,032	1,04	1,048
62 °C	0,967	0,976	0,985	0,993	1,002	1,01	1,019	1,027	1,036	1,045
63 °C	0,96	0,969	0,978	0,987	0,996	1,005	1,014	1,023	1,032	1,041
64 °C	0,953	0,963	0,972	0,982	0,991	1	1,01	1,019	1,028	1,038
65 °C	0,946	0,956	0,966	0,976	0,985	0,995	1,005	1,015	1,024	1,034
66 °C	0,939	0,949	0,959	0,97	0,98	0,99	1	1,01	1,02	1,031
67 °C	0,932	0,942	0,953	0,964	0,974	0,985	0,995	1,006	1,017	1,027
68 °C	0,924	0,935	0,946	0,957	0,968	0,979	0,991	1,002	1,013	1,024
69 °C	0,917	0,928	0,94	0,951	0,963	0,974	0,986	0,997	1,009	1,02
70 °C	0,909	0,921	0,933	0,945	0,957	0,969	0,981	0,993	1,005	1,017
71 °C	0,901	0,913	0,926	0,938	0,951	0,963	0,976	0,988	1,001	1,013
72 °C	0,893	0,906	0,919	0,932	0,945	0,958	0,971	0,984	0,997	1,01
73 °C	0,885	0,898	0,912	0,925	0,939	0,952	0,966	0,979	0,993	1,006
74 °C	0,876	0,89	0,904	0,918	0,932	0,947	0,961	0,975	0,989	1,003
75 °C	0,868	0,882	0,897	0,912	0,926	0,941	0,955	0,97	0,985	0,999
76 °C	0,859	0,874	0,889	0,905	0,92	0,935	0,95	0,965	0,981	0,996
77 °C	0,85	0,866	0,882	0,898	0,913	0,929	0,945	0,961	0,976	0,992
78 °C	0,841	0,857	0,874	0,89	0,907	0,923	0,94	0,956	0,972	0,989
79 °C	0,832	0,849	0,866	0,883	0,9	0,917	0,934	0,951	0,968	0,985
80 °C	0,822	0,84	0,858	0,875	0,893	0,911	0,929	0,946	0,964	0,982
81 °C	0,813	0,831	0,849	0,868	0,886	0,905	0,923	0,941	0,96	0,978
82 °C	0,803	0,822	0,841	0,86	0,879	0,898	0,917	0,937	0,956	0,975
83 °C	0,793	0,813	0,832	0,852	0,872	0,892	0,912	0,932	0,951	0,971
84 °C	0,783	0,803	0,824	0,844	0,865	0,885	0,906	0,927	0,947	0,968
85 °C	0,772	0,793	0,815	0,836	0,857	0,879	0,9	0,922	0,943	0,964
86 °C	0,761	0,784	0,806	0,828	0,85	0,872	0,894	0,916	0,939	0,961
87 °C	0,75	0,773	0,796	0,819	0,842	0,865	0,888	0,911	0,934	0,957
88 °C	0,739	0,763	0,787	0,811	0,835	0,858	0,882	0,906	0,93	0,954
89 °C	0,728	0,753	0,777	0,802	0,827	0,851	0,876	0,901	0,925	0,95
90 °C	0,716	0,742	0,767	0,793	0,819	0,844	0,87	0,895	0,921	0,946

91 °C	0,704	0,731	0,757	0,784	0,81	0,837	0,863	0,89	0,916	0,943
92 °C	0,692	0,72	0,747	0,775	0,802	0,829	0,857	0,884	0,912	0,939
93 °C	0,68	0,708	0,737	0,765	0,794	0,822	0,85	0,879	0,907	0,936
94 °C	0,667	0,697	0,726	0,756	0,785	0,814	0,844	0,873	0,903	0,932
95 °C	0,654	0,685	0,715	0,746	0,776	0,807	0,837	0,867	0,898	0,928
96 °C	0,641	0,673	0,704	0,736	0,767	0,799	0,83	0,862	0,893	0,925
97 °C	0,628	0,66	0,693	0,725	0,758	0,791	0,823	0,856	0,888	0,921
98 °C	0,614	0,648	0,681	0,715	0,749	0,782	0,816	0,85	0,884	0,917
99 °C	0,6	0,635	0,669	0,704	0,739	0,774	0,809	0,844	0,879	0,914
100 °C	0,585	0,621	0,657	0,693	0,73	0,766	0,802	0,838	0,874	0,91

Tableau B-2 : Densité de l'air (masse volumique de l'air) en fonction de température et humidité relative.

**APPENDICE C**  
**MODELE DE COMMANDE DE LA SERRE**

1. Commande du modèle de ventilation et de brouillard

Le modèle dynamique de bilan énergétique de la serre peut être obtenu en considérant les équations (2.25) et (2.26) trouver dans le chapitre2 comme suit :

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{\rho.C_p.V} (Q_{Ch} + R - \lambda.H_{Br}) - \frac{V_{v,m}}{V} (T_{int} - T_{ext}) - \frac{UA}{\rho.C_p.V} (T_{int} - T_{ext})$$

$$\frac{dH_{int}}{dt} = \frac{1}{\rho.V} H_{Br} + \frac{1}{\rho.V} E(R, H_{int}) - \frac{V_{v,m}}{\rho.V} (H_{int} - H_e)$$

Pour l'opération d'été, on met  $Q_{ch}=0$ , on peut alors noter que dans une première approximation le taux d'évapotranspirations  $E(R, H_{int})$  et dans la plupart des parties liés à l'énergie solaire radiante, par la relation simplifiée suivante :

$$E(R(t), H_{in}(t)) = \alpha \frac{R(t)}{\lambda} - \beta_T (H_{int}(t))$$

$$\frac{dT_{int}(t)}{dT} = \frac{1}{\rho.C_p.V} (R(t) - \lambda.H_{Br}(t)) - \frac{V_{v,m}(t)}{V} (T_{int}(t) - T_{ext}(t)) - \frac{UA}{\rho.C_p.V} (T_{int}(t) - T_{ext}(t))$$

$$\frac{dH_{int}}{dT} = -\frac{\beta_T}{\rho.V} H_{int}(t) + \frac{1}{\rho.V} H_{Br} + \frac{\alpha}{\lambda.V} R(t) - \frac{V_{v,m}(t)}{\rho.V} (H_{int}(t) - H_{ext}(t))$$

Ces deux équations sont non linéaires et couplées qui ne peuvent pas être mises en place dans la forme plutôt familière d'un système analytique non linéaire dû à leur complexité apparaissant dans les termes de produit entre la commande et les variables de perturbation.

Cependant, notre système peut être écrit sous la forme comme suite :

$$\begin{aligned}
X &= [X_1 \quad X_2]^T \hat{=} [T_{\text{int}} \quad H_{\text{int}}]^T; Y = X; r_1 = r_2 = 1 \\
U &= [U_1 \quad U_2]^T \hat{=} [V_{v,m} \quad H_{Br}]^T \\
V &= [V_1 \quad V_2 \quad V_3]^T = [R \quad T_{\text{ext}} \quad H_{\text{ext}}]^T \\
f_1(X, V) &= -\frac{UA}{\rho c_p V} X_1(t) + \frac{1}{\rho c_p V} V_1(t) + \frac{UA}{\rho c_p V} V_2(t) \\
f_2(X, V) &= -\frac{B_r}{V} X_2(t) + \frac{\alpha}{\lambda V} V_1(t)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_1^T(X, V) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{V} (V_2(t) - X_1(t)) & -\frac{\lambda}{\rho c_p V} \end{bmatrix} \\
g_2^T(X, V) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{V} (V_3(t) - X_2(t)) & \frac{1}{V} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$D(X, V) = \frac{1}{V} \begin{bmatrix} V_2(t) - X_1(t) & -\frac{\lambda}{\rho c_p} \\ V_3(t) - X_2(t) & 1 \end{bmatrix}$$

Le déterminant  $d(t)$  est donné par :

$$d(t) = \frac{1}{V^2} \left[ V_2(t) - X_1(t) + \frac{\lambda}{\rho c_p} (V_3(t) - X_2(t)) \right]$$

le système en boucle fermée prend la forme :

$$Y_i^{(1)} = \hat{U}_i; i = 1, 2.$$

Afin de fixer la dynamique de produit  $Y_i$  nous appliquons les lois de commande externes de la forme :

$$\hat{U}_i = -a_{i0} Y_i + b_i \tilde{U}_i \hat{=} -\frac{1}{\tau_i} (Y_i - \hat{U}_i); i=1,2$$

Et nous obtenons :

$$Y_i^{(1)} + \frac{1}{\tau_i} Y_i = \frac{1}{\tau_i} \tilde{U}_i; \quad i=1,2$$

Ou sous la forme de fonction de transfert :

$$H_i(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad i=1,2$$

Avec  $\tau_i$   $i=1, 2$  sont des constantes de temps du nouveau système

$$d(t) = \frac{Q(t)}{\rho \cdot C_p \cdot v}$$

$$D^{-1}(X, V) = \frac{1}{d(t)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\lambda}{\rho.C_p} \\ X_2(t) - V_3(t) & V_2 - X_1(t) \end{bmatrix}$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \end{bmatrix} = D^{-1}(X, V) \left\{ - \begin{bmatrix} f_1(X, V) \\ f_2(X, V) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} \right\}$$

Avec :

$$\begin{cases} \hat{U}_1(t) = -\frac{1}{\tau_1} X_1(t) + \frac{1}{\tau_1} \tilde{U}_1(t) \\ \hat{U}_2(t) = -\frac{1}{\tau_2} X_2(t) + \frac{1}{\tau_2} \tilde{U}_2(t) \end{cases}$$

$$U(t) = \frac{\rho.C_p V}{Q(t)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\lambda}{\rho.C_p} \\ X_2(t) - V_3(t) & V_2(t) - X_1(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{UA}{\rho.C_p V} X_1(t) - \frac{1}{\rho.C_p V} V_1(t) - \frac{UA}{\rho.C_p V} V_2(t) \\ \frac{\beta_r}{V} X_2(t) - \frac{\alpha}{\lambda V} V_1(t) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_1} X_1(t) + \frac{1}{\tau_1} \tilde{U}_1(t) \\ -\frac{1}{\tau_2} X_2(t) + \frac{1}{\tau_2} \tilde{U}_2(t) \end{bmatrix}$$

Donc, les commandes de la serre pour l'opération d'été peuvent être écrites comme suites:

$$U_1(t) = Q^{-1}(t) \left[ \frac{\rho.C_p V}{\tau_1} \tilde{U}_1(t) + \frac{\lambda V}{\tau_2} \tilde{U}_2(t) - (\alpha + 1) V_1(t) - U A V_2(t) + \left( U A - \frac{\rho.C_p V}{\tau_1} \right) X_1 \right. \\ \left. + \left( \lambda B_r - \frac{\lambda V}{\tau_2} \right) X_2(t) \right]$$

$$U_2(t) = Q^{-1}(t) \left[ \left( U A - \frac{\rho.C_p V}{\tau_1} \right) X_1(t) + \frac{\rho.C_p V}{\tau_1} \tilde{U}_1(t) - V_1(t) - U A V_2(t) \right] - \\ (X_2(t) - V_3(t)) + Q^{-1}(t) \cdot \rho.C_p V \left[ \left( \beta_r - \frac{V}{\tau_2} \right) X_2(t) + \frac{V}{\tau_2} \tilde{U}_2(t) - \frac{\alpha}{\lambda} V_1(t) \right] (V_2(t) - X_1(t))$$

$$\text{Avec: } Q(t) = \rho C_p [V_2(t) - X_1(t)] + \lambda [V_3(t) - X_2(t)].$$

## 2. Commande du modèle de ventilation et de chauffage

Dans ce qui suit, la méthode de contrôle présentée est appliquée au modèle de ventilation de la serre, aussi bien pour le système de chauffage.

En Hiver,  $H_{\text{int}} \geq H_{\text{ext}}$ ,  $H_{\text{Br}}=0$ , alors notre système prend la forme suivante:

$$\frac{dT_{\text{int}}(t)}{dT} = \frac{1}{\rho.C_p.V} (Q_{Ch} + R(t)) - \frac{V_{v,m}(t)}{V} (T_{\text{int}}(t) - T_{\text{ext}}(t)) - \frac{UA}{\rho.C_p.V} (T_{\text{int}}(t) - T_{\text{ext}}(t))$$

$$\frac{dH_{\text{int}}}{dT} = -\frac{\beta_T}{\rho.V} H_{\text{int}}(t) + \frac{\alpha}{\lambda.V} R(t) - \frac{V_{v,m}(t)}{\rho.V} (H_{\text{int}}(t) - H_{\text{ext}}(t))$$

$$X = [X_1 \quad X_2]^T \hat{=} [T_{\text{int}} \quad H_{\text{int}}]^T; Y = X; r_1 = r_2 = 1$$

$$U = [U_1 \quad U_3]^T \hat{=} [V_{v,m} \quad Q_{Ch}]^T$$

$$V = [V_1 \quad V_2 \quad V_3]^T = [R \quad T_{\text{ext}} \quad H_{\text{ext}}]^T$$

$$\frac{dX_1(t)}{dT} = \frac{1}{\rho.C_p.V} (U_1 + V_1) - \frac{U_1}{V} (X_1 - V_2) - \frac{UA}{\rho.C_p.V} (X_1 - V_2)$$

$$\frac{dX_2}{dT} = -\frac{\beta_T}{\rho.V} X_2 + \frac{\alpha}{\lambda.V} V_1 - \frac{U_1}{\rho.V} (X_2 - V_3)$$

$$f_1(X, V) = -\frac{UA}{\rho.C_p.V} X_1 + \frac{1}{\rho.C_p.V} V_1 \frac{UA}{\rho.C_p.V} V_2$$

$$f_2(X, V) = -\frac{\beta_T}{V} X_2 + \frac{\alpha}{\lambda V} V_1$$

$$g_1^T(X, V) = \left[ \frac{1}{V} (V_2 - X_1) \quad \frac{1}{\rho.C_p.V} \right]$$

$$g_2^T(X, V) = \left[ \frac{1}{V} (V_3 - X_2) \quad 0 \right]$$

$$D(X, V) = \begin{bmatrix} g_1^T(X, V) \\ g_2^T(X, V) \end{bmatrix} = \frac{1}{V} \begin{bmatrix} V_2 - X_1 & \frac{1}{\rho.C_p} \\ V_3 - X_2 & 0 \end{bmatrix}$$

Le déterminant de la matrice D(X,V) égale :  $d(t) = \frac{X_2 - V_3}{\rho.C_p.V^2}$

$$D^{-1}(X, V) = \frac{1}{d(t)} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\rho.C_p} \\ V_3 - X_2 & V_2 - X_1 \end{bmatrix}$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{d(t)} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\rho C_p} \\ X_2 - V_3 & V_2 - X_1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{UA}{\rho C_p V} X_1 - \frac{1}{\rho C_p V} V_1 - \frac{UA}{\rho C_p V} V_2 \\ \frac{\beta_T}{V} X_2 - \frac{\alpha}{\lambda V} V_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_1} X_1 + \frac{1}{\tau_1} \tilde{U}_1 \\ -\frac{1}{\tau_2} X_1 + \frac{1}{\tau_2} \tilde{U}_2 \end{bmatrix} \right\}$$

En appliquant la loi de commande de la forme (4.3) le système en boucle fermée prend la forme :

$$Y_i^{(1)} = \hat{U}_i ; i = 1, 2.$$

Afin de fixer la dynamique de produit  $Y_i$  nous appliquons les lois de commande externes de la forme :

$$\hat{U}_i = -a_{i0} Y_i + b_i \tilde{U}_i \hat{=} -\frac{1}{\tau_i} (Y_i - \hat{U}_i) ; i=1, 2$$

Nous obtenons :

$$Y_i^{(1)} + \frac{1}{\tau_i} Y_i = \frac{1}{\tau_i} \tilde{U}_i ; \quad i=1, 2$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \end{bmatrix} = D^{-1}(X, V) \left\{ - \begin{bmatrix} f_1(X, V) \\ f_2(X, V) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} \right\}$$

Avec :

$$\begin{cases} \hat{U}_1(t) = -\frac{1}{\tau_1} X_1(t) + \frac{1}{\tau_1} \tilde{U}_1(t) \\ \hat{U}_2(t) = -\frac{1}{\tau_2} X_2(t) + \frac{1}{\tau_2} \tilde{U}_2(t) \end{cases}$$

donc, les commandes de la serre pour l'opération d'hiver peuvent être écrites comme suites:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= \frac{1}{d(t)} \left( \frac{1}{\rho C_p \tau_2} X_1 - \frac{\beta_T}{\rho C_p V} X_2 + \frac{\alpha}{\lambda \rho C_p V} V_1 - \frac{1}{\rho C_p \tau_2} \tilde{U}_2 \right) \\ U_2(t) &= \frac{1}{d(t)} \left[ \left( \frac{UA}{\rho C_p V} X_1 - \frac{1}{\rho C_p V} V_1 - \frac{UA}{\rho C_p V} V_2 - \frac{1}{\tau_1} X_1 + \frac{1}{\tau_1} \tilde{U}_1 \right) (X_2 - V_3) \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{\beta_T}{V} X_2 - \frac{\alpha}{\lambda V} V_1 - \frac{1}{\tau_2} X_1 + \frac{1}{\tau_2} \tilde{U}_2 \right) (V_2 - X_1) \right] \end{aligned}$$

## REFERENCES

1. GAC A., BARTOLI R., FILLE J. F., BETHERY J., GERARD A. et FELDMANN C., « Echanges thermiques dans les serres », Bulletin Technique du Génie Rural, France, 1973.
2. MAMDANI. E. H, Assilian.S: «An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller» Inter. J. of Manchester studies, 1975, Vol 7.
3. R.M. Phelan, «Automatic Control Systems. Ithaca, NY: Cornell Univ. Press», 1977.
4. KITTAS.C, « Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres », Thèse de Docteur Ingénieur, Perpignan (1980).
5. B.P Ager And J.A. Tickner «The Control of microbiological and ventilation Hazards Associated with air Conditioning And Ventilation Systems»,1983,Vol: 27. PP: 341-385-1983.
6. Kenneth A. Becket, « La culture sous abri : serre et mini-serre », Edition Fernand Nathan, Encyclopédie pratique du jardinage, 1981, Bibliothèque d'Agronomie de Blida.
7. R.M.Phelan, L.D.Albright, A. Stiawan «Application of pseudo-derivative feedback algorithm in greenhouse air temperature control», 2000 , vol: 26, pp: 283-302 (20).
8. MONTEIL C. «Contribution informatique h l'analyse énergétique des serres agricoles », 1990,Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National. Polytechnique de Toulouse 168 p.
9. C. Monteil, G. Issanchou « Modèle énergétique de la serre agricole » J. Phys III, 1991 France 1, pp: 429-454.
10. Young, P.C., Lees, M.J. «The Active Mixing Volume (AMV): A New Concept in Modelling Environmental Systems. Statistics for the Environment», 1993,.
11. P I Daskalov. «Prediction of temperature and humidity in a naturally ventilated pig building».(1997), Journal of Agricultural Engineering Research, vol 68, PP: 329–339 (11).
12. LACROIX R., «Une Etude comparative de la structure des modèles de transfert d'énergie et de masse dans les serres de production», 1988, rapport de Maîtrise en Sciences de l'environnement, université du Québec, 110 p.
13. Chao, K, R. S, Gates, and R. G. Anderson. «Knowledge based control systems for single stem rose production»: Part I. systems analysis and design. Transactions of the ASAE, 1998, vol : 41, pp : 1153-1161 .

14. RS. Gates , K,Chao, N.Sigrimis «Fuzzy control simulation of plant and animal environments », 1999, paper N: 993136 an ASAE voice 616,429,0300.
15. G.D. Pasgianos, K.G. Arvanitis, P. Polycarpou, N. Sigrimis, « A nonlinear Feedback technique for greenhouse Environmental Control»,2003 , Computers and Electronics in Agriculture, vol: 40, pp : 153-177.
16. Young, P.C., Price, L., Berckmans, D., Janssens, K., «Recent developments in the modelling of imperfectly mixed airspaces»,2000, Comput. Electron. Agric. Vol: 26, pp: 239-254
17. Arvanitis, K.G., Paraskevopoulos, P.N., Vernardos, «Multirate adaptive temperature control of greenhouses», Comput. Electron. Agric, 2000, Vol: 26, pp: 303- 320.
18. N.A. Sigrimis, K.G. Arvanitis, and G.D. Pasgianos, «Synergism of high and low level systems for the efficient management of greenhouses» *Comp. Electron. Agric*, 2000, vol: 29, pp: 21-39.
19. Mokhtari. « Matlab 5.2 et 5.3 pour étudiants et ingénieurs », CDROM 2000IBSN : 3-540-66649-4.
20. Euldji bilel , Medjber.A , «commande d'un chariot par logique floue».projet de fin d'études, Département Electronique de Blida, Session octobre2000.
21. Sigrimis, N., Arvanitis, K.G., Pasgianos, G.D., Ferentinos, K.P., «Hydroponics water management using adaptive scheduling with an on-line optimizer», 2001, Comput. Electron. Agric. Vol: 31, pp: 31-46.
22. Lambert M; Lemay S P; Barber E M; Crowe T «Humidity control for swine buildings in cold climate» part I, Canadian Bio systems Engineering, 2001, vol: 43, pp: 529–536
23. K. Chao, R. S. Gates, N. Sigrimis « Fuzzy logic controller design for staged heating and ventilating systems» Transaction of the ASAE 0001-2351-00-4306-1885, 2001, vol: 43, pp: 1885-1894.
24. C. Gary , « Gestion du climat et des cultures sous serre : maîtrise du rendement et du calibre de la tomate », INRA, mai 2002.
25. S. Pedersen and K. Sallvik , « Heat and moisture production at animal and house levels » 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Research Centre Bygholm, 2002, ISBN 87-88976-60-2.
26. N.Sigrimis, K.G.Arvanitis « An intelligence non interacting technique for climate contrôle of greenhouses » 15 th triennial world congress, Barcelona, Spain 2002IFAC.
27. Aerts J, M. Wathes , M. Berckmans «Dynamic data-based modelling of heat production and growth of broiler chickens»,2003 , vol: 84, pp: 257–266.
28. H.K. Khalil « Nonlinear systems», 2002 third edition, prentice hall, ISBN0130673897.
29. M. Neil, « Nonlinear control system », 2003, springer, berlin IBSN: 0-8247-4112-9.

30. A. Mourad «Réalisation d'une station météo à base d'une carte à micro contrôleur MC68HC11 », projet de fin d'étude, D'électronique de Blida, Session 2004.
31. P.I. Daskalov ; K.G. Arvanitis, G.D. Pasgianos, N.A. Sigrimis « Non-linear adaptative and humidity control an animal building» science direct, ELSEVIER, Bio systems Engineering , 2005 ,vol: 93(1) pp: 1- 24.
32. Michel Bonvin, Gilbert Morand, Antoin Reist « Horticole intégration des processus énergétiques dans les culture sous abri » Nov2005.
33. Touiza Maamar « Etude et implémentation d'un système de contrôle en temps réel d'un procédé industriel VIA une architecture Client/Server » Mémoire magister département Electronique de Blida session 2006.
34. TPSB Cerizay, « Equipements et accessoires», site, Boulevard de l'atlantique, BP30330-79143, France, 2007, Email : [info@tpsb-cerzay.com](mailto:info@tpsb-cerzay.com)