REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **É**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Contrôle climatique de la température et d'humidité sous serre agricole en été

Présentés par :

Allouane Mohamed

Nouari Mohamed

Proposés et Dirigés par :

Mr. MEDJBER Ahmed

Promotion 2022

الملخص:

يعتبر هذا العمل دراسة، نموذج و محاكاة المناخ من اجل التحكم الذاتي والتحكم اليدوي في البيوت الزراعية.

قمنا بتغطية أساسيات المنطق الضبابي ونطاق هذا الأمر. ثم نعرض كفاءة وحدة التحكم الغامضة في مثال نقارن نتيجة الأخير بنتيجة منظم مشتق متكامل متناسب كلاسيكي PDOF.

نحن نتعامل مع تطبيق لأمر الغامض و الكلاسيكي علي بيت زراعي بعد نمذجة النظام نقوم بمحاكاته باستخدام برنامج " SIMULINK/Matlab " أظهرت نتائج المحاكاة التي حصلنا عليها كفاءة التحكم الضبابي على التحكم الكلاسيكي من خلال خصائص الاستجابة هذا النوع من المنظمين لديه وقت صعود أفضل واستجابة سريعة. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من خلال تغيير وقت التأخير متانة وحدة التحكم الضبابية .

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

الكلمات المفتاحية : الدفيئة الزراعية ، التحكم البيئي ، التغذية الراجعة الخطية ، الفصل ، النظام غير الخطي.

Résumé:

Ce travail est considéré comme une étude, un modèle et une simulation climatique pour la maîtrise de soi et le contrôle manuel des maisons agricoles.

Nous avons couvert les bases de la logique floue et la portée de cela. Nous montrons ensuite l'efficacité mystérieuse de la console dans un exemple comparant le résultat de cette dernière à celui d'un régulateur dérivé intégré PDOF classique.

Nous avons affaire à une application mystérieuse et classique à une serre agricole après la modélisation du système que nous simulons à l'aide du programme "SIMULINK/Matlab" les résultats de simulation que nous avons obtenus un contrôle brumeux efficace sur le contrôle classique grâce aux caractéristiques de réponse de ce type de régulateur a une meilleure disponibilité et une réponse rapide. Les résultats de simulation obtenus en changeant le délai montrent la durabilité du contrôleur flou.

Nous avons appliqué cette approche en la surveillant afin de réguler la chaleur et l'humidité à l'intérieur d'une serre agricole.

Mots clés : serre agricole , controle de l'environnement , linéarisation de rétroaction , découplage , systéme non linéares .

ABSTRACT :

This work is considered as a study, model and climate simulation for self-control and manual control of farm houses.

We covered the bases of fuzzy logic and the scope of that. We then show the mysterious efficiency of the console in an example comparing the result of the latter to that of an integrated regulator PDOF classic.

We are dealing with a mysterious and classic application to an agricultural greenhouse after modelling the system that we simulate using the program SIMULINK/Matlab" the simulation results that we have obtained an effective misty control over conventional control thanks to the response characteristics of this type of regulator has better availability and rapid response. The simulation results obtained by changing the delay show the durability of the fuzzy controller.

We applied this approach by monitoring it to regulate the heat and humidity inside an agricultural greenhouse.

keywords: agricultural greenhouse, environmental control, feedback linearization, decoupling, non-linear system.

Remerciement

Notre remerciement va en premier lieu à ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous avoir permis d'en arriver là.

Nous tenons à remercier particulièrement notre encadreur Mr MEDJBER AHMED pour son encadrement et pour l'intérêt qu'elle a manifestée à notre travail.

Nous remercierons très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examinateur.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui ont contribué à notre formation tout au long de nos années d'étude.

Nous tenons également à remercier tous nos collègues de promotion que nous avons eu le plaisir de les côtoyer pendant cette période de formation.

Nous remercierons tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents qui ont contribué à ma réussite et m'ont encouragé.

A tout ma famille.

A tous ceux qui me sont chers.

Nouari Mohamed

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents

A mes frères et soeurs et toute la famille

A tous mes professeurs

A tous mes amis et mes collègues

Je n'oublie pas les gens qui m'ont aide.

Allouane Mohamed

Liste des figures

Figure I.1 : serre chapelle……. …….. ……..3
Figure I.2 : multi chapelle……. ….....4
Figure I.3 : la serre Tunnel…….. ……. ….....4
Figure I.4 : la serre gonflable……...5
Figure II.1 : Description énergétique de la serre…….....15
Figure III.1: Schéma synoptique de la serre agricole…….....30
Figure III.2: Schéma de commande avec correcteur de PID……..31
Figure III.3: Structure générale de la commande PDF……...33
Figure III.4: Structure de la commande de PD0F appliquée au modèle de processus…….....34
Figure III.5: Stratégie globale de la commande…….35
Figure III.6 :Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.…….....39
Figure III.7 :Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes……41
Figure III.8 : Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement d'étape de la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.. ……..…….42
Figure III.9 : Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement d'étape de la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.. ……..…….43

Figure III.10 : Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques fixes……..……..……..…44
Figure III.11 : Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphérique fixes ……...45
Figure III.12 : Evolution de température et humidité tunisienne au cours de deux jours 1et 15/Février/1996…….……...…49

Figure III.13 : Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques

tunisienne……..….50
Figure III.14 : Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques tunisienne…….…...51
Figure.IV.1 Opérateur NON…….....55
Figure.IV.2 **:** Opérateur ET et OU…….....56
Figure IV.3: Structure générale d'un système basé sur la logique floue……56
Figure.IV.4: Les opérations du contrôleur floue 58
Figure IV.5: Contrôleur flou du système de refroidissement pour un réglage grossier .. ……59
Figure IV.6 : Fonctions d'appartenances pour un réglage grossier de la température…. ……60
Figure IV.7: Réglage grossier de température sans changement de consigne……61
Figure IV.8 : Réglage grossier de température avec changement de consigne …….62
Figure IV.9 : Contrôleur flou du système d'humidification pour un réglage grossier de l'humidité…….....63
Figure. IV.10 : Fonctions d'appartenances des sous-ensembles flous de chaque variable linguistique (e, De, u) de contrôle d'humidité ……..….64
Figure IV.11 **:** Réglage grossier d'humidité sans changement de consigne ……..….65
Figure IV.12 : Réglage grossier d'humidité avec changement de consigne …….66
Figure IV.13 : Contrôleur flou du système de refroidissement pour un réglage fin…….67
Figure IV.14 : Fonction d'appartenance de température ……..68
Figure IV.15 : Réglage fin de température sans changement de consigne……...69
Figure IV.16 : Réglage fin de température avec changement de consigne ……....71
Figure IV.17 : Contrôleur flou du système d'humidification Pour un réglage fin ……....72
Figure IV.18 : Fonction d'appartenance d'humidité …….....72
Figure IV.19 : Réglage fin d'humidité sans changement de consigne ……..75
Figure IV.20 : Réglage fin d'humidité avec changement de consigne.....76

Liste des tableaux

Tableau .III.1 : Température tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996
……..47
Tableau. III.2**:** Humidité tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996
……..48
Tableau IV.1 **:** Table de décision pour un réglage grossier de la température…….60
Tableau IV.2: Matrice d'appartenance pour un réglage grossier d'humidité……64
Tableau IV.3: Matrice d'appartenance pour un réglage fin de la température…….68
Tableau IV.4: Matrice d'appartenance pour un réglage fin d'humidité……72
Tableau: Densité de l'air (masse volumique de l'air) en fonction de température et humiditérelative

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I:Généralité sur les serres

I.1.Introduction : 2

I.2.Les serres agricoles : 2

I.2.1.Définition: 2

I.2.2.Intérêt de la serre : 2

I.2.3.Choix de la serre et de sa couverture : 3

I.2.4.Les différents types de serre : 3

***I.2.4.1.La serre chapelle* :** 3

I.2.4.2.La serre multi chapelle : 4

I.2.4.3.La serre tunnel : 4

I.2.4.4.La serre gonflable : 5

I.2.5.Caractéristiques des serres : 5

I.2.5.1 La structure de la serre: 5

I.2.5.2.Forme extérieure et Taille: 6

I.2.5.3.Climat : 6

I.2.5.4.Orientation de la serre : 7

I.2.5.5. Aspects spécifiques d'une serre : 7

I.2.5.6.Source d'énergies dans les serres 8

I.2.5.7.Conditions climatiques d'une serre : 8

I.2.5.8.Mouvements de l'air : 9

I.2.5.9.Aération : 9

I.2.5.10.Hétérogénéité climatique : 10

I.2.5.11.Le revêtement : 10

I.3.la technologie dans les Serres agricoles : 11

I.3.1.Ventilation : 11

I.3.1.1.Ventilation traditionnelle et naturelle : 11

I.3.1.2.Ventilation développée : 11

I.3.2.Chauffage de Serre: 12

I.3.2.1.Le chauffage au gaz : 12

I.3.2.2.Le chauffage à pétrole : 12

I.3.2.3.Le Chauffage électrique : 12

I.3.3.Systèmes de refroidissement : 13

I.3.3.1.Rideaux d'ombrage : 13

I.3.3.2.Panneaux humides de refroidissement (Cooling Pad) : 13

I.3.3.3.Brouillard Basse Pression (Fog System): 14

I.4.Conclusion : 14

CHAPITRE IIMODELISATION D'UNE SERRE AGRICOLE

II.1.Introduction : 14

II.2.Description du modèle : 14

- **II.2.1.Les échanges radiatifs** 14
- **II.2.2.Les échanges convectifs** 14
- **II.2.3.Les échanges conductifs** 15

II.3.Bilan énergétique 15

II.3.1.Bilan d'énergie au niveau de l'air intérieur : 15

II.3.2.Bilan de la couverture extérieure : 16

II.3.3. Bilan sur le sol : 16

II.4.Température du sol : 16

II.5.Méthode sur une journée de référence : [20] 17

II.6.Modèle énergétique de la serre agricole 17

II.6.1.La chaleur produite par des plantes : 19

II.6.2.La chaleur perdue par l'évaporation de l'eau 19

II.6.3.La chaleur perdue par l'humidificateur : 20

II.6.4.La chaleur perdue par le système de ventilation : 20

II.6.5.La chaleur transféré par la couverture : 21

II.6.6.La chaleur produite par le soleil : 22

II.7.Humidité intérieure et extérieure de la serre : 22

II.8.Taux d'évapotranspiration des plantes E(R,Hint) : 23

II.9.Linéarisation et découplage du système : 25

II.10.Modèle dynamique du climat d'une serre agricole : 25

II.10.1.Modèle de commande de la serre : 27

II.11.Modèle Commande de ventilation et de brouillard : 28

II.13.Conclusion : 29

CHAPITRE IIISTRATEGIE DE COMMANDE ET SIMULATIONPAR CONTROLEURPDOF

III.1.Introduction : 31

III.2.Schéma synoptique de la serre agricole : 31

III.3.Regulateur PID : 32

Description du correcteur : 32

III.4. Régulation par le contrôleur PDF (Pseudo-Dérivative Feedback Contrôler) 32

III.5.Méthode de traitement : 34

III.6. Régulation par le contrôleur PD0F : 36

III.7.Simulation : 38

III.7.1 Régulation de la température et de l'humidité par contrôleur PDOF 39

III.7.1.1 Schéma fonctionnel 39

III.7.1.2. Premier test sans changement des conditions extérieures 39

III.7.1.2.1. Contrôle du système sans changement de consigne (point de réglage) 39

III.7.1.2.2. Contrôle avec changement de consigne 42

III.7.1.2.3. Contrôle avec série d'impulsions de consigne 44

III.7.1.3.Deuxième teste avec changement des conditions extérieures 47

III.8.Interprétation 52

III.9.Conclusion 52

CHAPITRE IV :Régulation de la température et de l'humidité par contrôleur flou

IV.1. Introduction 54

IV.2. les sous_ensenble flous : 56

IV.3.Opérateurs de la logique floue 55

IV.4.Raisonnement floue : 57

IV.5. Structure generale d'un system flou : 57

IV.6.Avantages et inconvénients des régulateurs flous : 58

IV.7. Principe d'un contrôleur flou 58

IV.8.Contrôle de notre système 60

IV.8.1.Réglage grossier 60

IV.8.1.1.Régulation de température 60

IV.8.1.2.Régulation de l'humidité 64

IV.8.2.1. Régulation de température 69

IV.8.2.2. Régulation d'humidité 73

IV.9.Interprétation 77

IV.10.Conclusion 77

Conclusion générale 78

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES

THEORIE SUR LA CHALEUR SPECIFIQUE ET LA DENSITE DE L'AIR

MODELE DE COMMANDE DE LA SERRE

Références bibliographiques

INTRODUCTION GENERALE

Une serre est une structure qui peut être parfaitement close destinée en général à la production agricole. Elle vise à soustraire aux éléments climatiques les cultures vivrières ou de loisir pour une meilleure gestion des besoins des plantes et pour en accélérer la croissance ou les produire indépendamment des saisons. [1]

L'automatisation de la serre agricole est a pour objectif d'améliorer la productivité et économiser l utilisée et de simplifier la vie des agriculteurs.

Dans ce mémoire, nous avons traité la modélisation et la simulation du climat à l'intérieur d'une serre agricole, cette dernière est constitué un système dynamique très complexe, la température et l'humidité à l'intérieure sont non linéaires et fortement couplées par les lois thermodynamiques, ce qui est détaillé dans cet ouvrage. Une nouvelle approche à été utilisée (Feedback/ Feedforward) à la linéarisation et découplage pour la commande de climat de notre 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.

L'automaticien sera aussi amené à traiter des problèmes de commande difficiles compte tenu des performances souhaitées. Il devra essayer plusieurs types de commande et après comparaison, choisir la commande la plus adaptée [4]. Ainsi, après avoir envisagé des commandes classiques (commande optimale, etc...), il s'orientera vers des commandes dites «avancées», qui s'appuient sur de nouveaux concepts tel que: la logique floue, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques.

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 ».

• Dans Le deuxième chapitre, intitulé « Modélisation d'une serre agricole ».

• Dans le troisième et quatrième chapitre, intitulé «Stratégie de commande et simulation». Avec les deux contrôleurs PDOF et Flou, nous utiliserons le Simulink avec un programme réalisé sous le logiciel MATLAB.

• Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et les perspectives.

Chapitre I

Généralité sur les serres

I.1.Introduction :

La serre est une structure qui peut être parfaitement close destinée en général à la production agricole, elle vise à protéger les cultures vivrières (légumes et fruits) ou de loisir (fleurs) des conditions climatiques rudes.

Dans ce chapitre, nous présenterons une vue globale sur les différents types de serres agricoles, ainsi que les paramètres climatiques qui contrôlent la croissance des plantes, et aussi les derniers systèmes automatique qui sont utilisés pour contrôler et réguler les paramètres climatiques avec précision, pour répondre aux besoins des plantes et leur libération du climat extérieur et même des saisons.

Le recours aux techniques de régulation automatique a permis de réaliser les objectifs techniques et économiques par le producteur tels que :

• Augmenter le rendement de la production agricole.

• Réduire la consommation d'énergie.

• Améliorer la qualité des produits agricoles.

• Production de légumes et de fruits en toutes saisons.

• Contrôle et gestion à distance de la quantité et du type de production agricole.

I.2.Les serres agricoles :

I.2.1.Définition:

Une serre est une structure close ou semi-ouverte translucide, en verre ou en plastique, soutenue par une structure métallique ou en bois, destinée en général à la production agricole. Elle vise à protéger les cultures vivrières ou de loisir des éléments climatiques, afin d'améliorer la production des plantes, d'en accélérer la croissance et de les produire indépendamment des saisons grâce à un gain de température par blocage de la convection (et non par effet de serre) sous la structure.

La culture sous serre s'appelle la serriculture.

Une serre peut également être un édifice architectural d'agrément, soit privé de petite taille à l'intérieur d'une maison, soit ouverte au public et de grande taille, qui satisfait l'esthétique par sa forme architecturale et par la richesse des collections de plantes qu'elle abrite. [1] [2].

I.2.2.Intérêt de la serre :

La serre de culture offre la possibilité de s'affranchir des contraintes climatiques extérieures (pluie, vent, froid), elle est conçue pour recréer un environnement donné (microclimat). Elle permet le chauffage de l'air et des racines, le contrôle de l'irrigation et de la fertilisation, l'enrichissement en CO2 et le contrôle de l'humidité. Elle joue un rôle économique en présentant des produits sur le marché en contre saison.

La serre permet ainsi d'obtenir une production végétale dans des conditions meilleures que celles existant naturellement par conséquent une meilleure qualité, du produit. Pour aboutir à ces résultats, il faut répondre minutieusement aux exigences de la culture pour les différents facteurs intervenant dans sa croissance et son développement, ceci suppose la connaissance des interactions entre ces divers paramètres [3].

I.2.3.Choix de la serre et de sa couverture :

Les principaux critères de choix d'une serre et sa couverture d'après sont les suivants [3] :

-La transmission du rayonnement utile à la photosynthèse (elle détermine le potentiel de la production)

-La solidité et la durabilité (attention aux zones comportent des risques climatiques)

-La fonctionnalité et la facilité de maintenance (elle joue un rôle dans le coût de main-d'œuvre)

-Les économies d'énergie et le prix

I.2.4.Les différents types de serre :

La classification des serres peut être faite soit de point de vue technologique, ou de point de vue professionnel.

I.2.4.1.La serre chapelle :

La chapelle est l'unité de construction de la serre, formée par deux parois latérales verticales (ou très légèrement penchées) et un toit à deux pentes, généralement symétriques.

La chapelle est caractérisée par sa largeur, les dimensions courantes sont approximativement entre (3, et 16m)



Figure I.1 : serre chapelle

I.2.4.2.La serre multi chapelle :

La Serre Multi chapelle est constituée de nefs adossées avec une couverture elliptique et des parois latérales verticales. Il s'agit d'une serre très polyvalente qui s'adapte parfaitement à tous types de climats et de cultures et permet d'adapter la largeur de chaque chapelle au cadre de plantation des cultures.

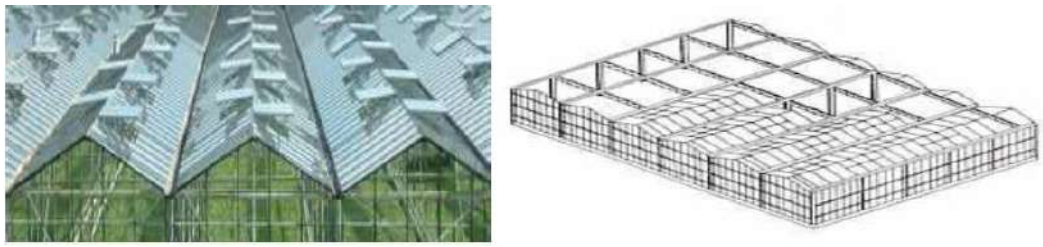


Figure I.2 : multi chapelle.

I.2.4.3.La serre tunnel :

En général, la serre tunnel se compose d'une série d'éléments juxtaposés constitués chacun par une armature en tube d'acier assemblé par des boulons. La largeur est de 3 à 9 m. Le film plastique se fixe par divers systèmes de clips.

La serre tunnel est spécialement dédiée aux cultures précoces. Elle est incontournable pour le potager puisqu'elle permet de prolonger la récolte de fruits et légumes hors saison, voire de permettre des floraisons d'été. Elle doit son nom à sa forme demi-circulaire. Sa structure se maintient grâce à de grands arceaux métalliques. Elle est recouverte d'une bâche plastique spécialement conçue pour les serres. Cette bâche souple et transparente permet de doubler l'efficacité de la serre.



Figure I.3 : la serre Tunnel.

I.2.4.4.La serre gonflable :

La serre gonflable est une serre dont les parois sont flexibles de manière où son vrai volume avec l'état de son climat change (la température élevée provoque une détente qui fait augmenter la pression totale intérieure, la condensation de la vapeur d'eau diminue la pression totale, et provoque une dépression) par conséquent la paroi se rabat sur l'armature de la serre.



Figure I.4 : la serre gonflable

I.2.5.Caractéristiques des serres :

I.2.5.1 La structure de la serre:

Le choix du matériau de la structure est en fonction du type de serre choisi, ce qui revient à la question de la place disponible et du budget.

- **Structure en aluminium:**C'est un matériau très pratique et très utilisé, pour sa solidité et le peu d'entretien qu'il nécessite. Une structure en aluminium de qualité peut durer une centaine d'années.
- **Structure en bois :** C'est le matériau le plus séduisant car le plus « noble » et le plus esthétique, il faut le choisir imputrescible et s'il est bien entretenu, il pourra durer toute une vie.
- **Structure en acier :** L'acier présente l'avantage d'être souple et résistant. Une serre en acier pourra avoir la longévité d'une serre en aluminium à condition de prendre garde à la rouille.
- **Structure en PVC:**Le PVC est relativement bon marché et c'est un des meilleurs isolants, mais il est peu apprécié esthétiquement et sa longévité n'est pas exceptionnelle. [17]

I.2.5.2.Forme extérieure et Taille:

Les serres sont défirent les une des autres sur leurs forme extérieure, la taille et l'espace réservé, cette différence est dépend au type d'utilisation, Ainsi que l'environnement, le climat extérieur et le terrain.

Les entreprises de fabrication étudient l'emplacement géographique et choisiront la forme qui mieux adaptée à cette zone.

I.2.5.3.Climat :

Le climat spontané à l'intérieur de la serre dépend essentiellement du climat extérieur, des caractéristiques physiques de l'air intérieur, de la forme de la serre, du volume de l'abri, de son orientation et des qualités physico-chimiques des matériaux de la couverture utilisée. Les principaux facteurs du micro climat, qui sont modifiés par rapport à l'extérieur sont : la lumière, la température, l'humidité et les concentrations des gaz (CO2, O2).

- **Lumière :** Les conditions d'éclairement à l'intérieur de la serre sont sous l'étroite dépendance du climat lumineux naturel, la meilleure utilisation de ce climat naturel sera liée au choix des matériaux de couverture (verre, pvc, polyéthylène) et aux conditions de leur mise en œuvre (structure, forme et orientation des serres) qui ont une grande influence sur l'utilisation raisonnable de ce climat lumineux naturel. [3]

- **Température :** La température de l'air, prise comme caractéristique du climat de la serre, est la résultante du bilan d'énergie établi sous la serre. L'effet de serre se présente généralement de la façon suivante :

- Pendant la nuit la déperdition d'énergie par rayonnement infrarouge limite l'atténuation de refroidissement nocturne, dans le cas des nuits particulières et en absence de turbulences à l'intérieur de la serre ce phénomène peut entrainer des abaissements de température plus marqués, on parle alors d'inversement de température.
- L'élévation de température de l'air pendant le jour qui devient rapidement excessive lorsque le rayonnement solaire est intense, est dû aux effets conjugués des piégeages des apports radiatifs solaires et à la réduction d'échanges convectifs. Il est alors nécessaire d'intervenir en augmentant la vitesse de renouvellement de l'air par aération statique ou par ventilation dynamique. [5]

- **Humidité :** L'accroissement de la température de l'air dans la serre tend à créer un déficit de saturation et donc une diminution d'humidité, alors que le confinement et l'étanchéité de la serre la favorisent. Les conséquences de l'humidité sont :

- Pendant le jour **:** L'élévation de la température de l'air peut entraîner un abaissement exagéré de son humidité relative et provoquer un véritable "stress hydrique" au niveau de la végétation d'où la nécessité de prévoir un système de ventilation de la serre. [5]
- Pendant la nuit **:** Les serres étant généralement fermées, l'humidité relative est élevée.

Au cours de la nuit, la température baisse. Il se produit fréquemment des condensations sur les parois et les gouttes condensées peuvent tomber sur la végétation (Conditions favorables au développement de certaines maladies…).

- **Teneur en gaz carbonique :**Dans le cas des serres très étanches (peu aérées), il est souhaitable de réaliser un enrichissement en CO2 d'une façon judicieuse pour qu'il soit bénéfique, aussi bien pour le rendement que pour la photosynthèse. Dans les régions arides, où le besoin de refroidissement est important dès le début de la saison de culture, la ventilation est alors abondante pendant la majeure partie de la journée, l'enrichissement en CO2 est peu applicable. [5]

I.2.5.4.Orientation de la serre :

Le réglage de l'orientation de la serre selon la course du soleil ainsi que selon la direction des vents a causé des difficultés pour éviter l'hétérogénéité de certaines conditions climatiques à l'intérieure de la serre. Dans la région méditerranéenne, où le soleil s'élève sur l'horizon, les vérifications ont montré que l'éclairement solaire satisfaisant pouvait s'obtenir par l'adaptation d'une orientation nord-sud. La comparaison entre le matin et le soir a montré que cette orientation permet d'avoir une meilleure homogénéité du flux lumineux. Compte tenu de la direction générale Nord-

sud des vents dominants, cette orientation a l'avantage de réduire les effets néfastes des vents tant sur la structure que sur les déperditions énergétiques de la serre [4]

I.2.5.5. Aspects spécifiques d'une serre :

- **Photosynthèse :** La photosynthèse est un processus de conversion d'énergie radiative en énergie chimique, transportable et réutilisable. Elle repose sur la transformation de l'oxyde, du carbone et d'hydrogène à faible énergie potentielle chimique, en hydrates de carbone à énergie potentielle chimique élevée [6].
- **Respiration :** Les hydrates de carbone formés par photosynthèse sont distribués dans tout l'organisme et peuvent alors être soit polymérisés en macro-molécules destinées à l'élaboration des parois cellulaires, soit mis en réserve sous forme de sucre ou de graisse, soit finalement utilisés comme source d'énergie lors de synthèse d'autres substances organiques. La récupération de l'énergie chimique emmagasinée dans les hydrates de carbone s'effectue par un processus de dégradation oxydative, dénommé respiration, qui peut être considéré dans une certaine mesure comme la réaction inverse de la photosynthèse [7].
- **Évapotranspiration :** Les transferts d'eau du système sol-végétation dans la serre peuvent s'effectuer selon deux canaux. Soit par évaporation directe de l'eau du sol soit par transpiration des végétaux préalablement prélevée dans le sol par leurs systèmes racinaux. L'évaporation directe se produit essentiellement dans une zone de faible épaisseur située immédiatement sous la surface du sol. Les deux processus se produisent simultanément et de telle manière qu'il est difficile de les distinguer. Ils sont englobés sous le terme général d'évapotranspiration [6].

I.2.5.6.Source d'énergies dans les serres

- **Géothermie :** Il s'agit d'exploiter des poches d'eau situées dans les couches profondes du sous-sol; vers 1000 à 2000 [m] de profondeur. L'eau contenue dans ces poches se distingue par des températures de l'ordre de 50 à 70 °C. Cette énergie géothermique est utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour le chauffage des serres agricoles en vue d'amélioration des cultures sous serre. En Algérie les puits d'eau chaude qui étaient destinés depuis plusieurs décennies pour la consommation humaine et pour l'irrigation, ne furent exploité pour le chauffage des serres qu'a partir de l'année 1974 [6].
- **Énergie solaire** : La serre elle-même est un capteur solaire à la fois biologique (photosynthèse) et thermique. Le capteur thermique est même souvent trop efficace

puisqu'il faut fréquemment aérer la serre et donc rejeter la chaleur à l'extérieur par ventilation. Un système de stockage de cette chaleur doit être prévu au vu non seulement des rapports d'ensoleillement jour/nuit mais aussi des rapports hiver/été ce qui représente un obstacle majeur [6].

I.2.5.7.Conditions climatiques d'une serre :

- **Les Échanges thermiques :**Les conditions climatiques au voisinage du sol résultent des échanges de chaleurs et de masse entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Ainsi nous considérerons, dans cette étude que l'agrosystème serre peut être décrit à partir des transferts d'énergie et de masse. Ces transferts peuvent s'effectuer sous trois formes différentes par rayonnement, convection et conductions [9].
- **Les échanges radiatifs**: De courtes longueurs d'ondes aussi bien directs que diffus, qui sont transmis, réfléchis et / ou absorbés par les différents milieux considérés. Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes entre ces milieux, le ciel et l'extérieur.
- **Les échanges convectifs**: échanges de chaleur sensible et latente par aération entre les différents milieux et l'extérieur, plus l'échange de chaleur latente d'évaporation ou de condensation.
- **Les échanges conductifs** : concernent essentiellement les transferts thermiques entre la surface du sol et les déperditions thermiques à travers les parois ou les vitres. La modélisation et l'établissement du modèle mathématique, traduisant les phénomènes considérés, aboutissent alors à la résolution d'un système d'équations, ici par des méthodes numériques considérées [8].

I.2.5.8.Mouvements de l'air :

L'une des différences majeures entre les conditions climatiques à l'intérieur de la serre et celles qui règnent à l'extérieur concerne les vitesses du vent qui entrent en jeu. La vitesse moyenne du vent est de l'ordre de 4m. s-1 à l'extérieur tandis qu'elle est nettement plus faible à l'intérieur.

Le rôle d'abri joué par la structure de la serre est essentiel car la croissance des plantes est sensiblement réduite lorsqu'elles sont soumises à des vitesses d'air très supérieures à $0.5 m.s^{-1}$. Néanmoins, le mouvement d'air est nécessaire car il facilite les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et du dioxyde de carbone entre les plantes et l'air environnant [12]

Même dans le cas d'une serre fermée, l'air à l'intérieur n'est pas complètement au repos du fait qu'il existe des gradients thermiques (différence de températures). Ces gradients créent des mouvements d'air convectifs. Par ailleurs, la serre n'étant pas complètement étanche, des

mouvements d'air peuvent être induits par le vent extérieur. Parfois également, les mouvements d'air sont créés par l'utilisation du chauffage ou de ventilateurs pour contrôler le microclimat à l'intérieure de la serre**.**

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

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

I.2.5.9.Aération :

Le processus d'aération influence directement sur le transport d'énergie et de masse entre l'environnement extérieur et l'intérieur. Il s'agit de: - Dissiper le surplus de chaleur Accroître les échanges de dioxyde de carbone et d'oxygène - Maintenir un niveau d'humidité acceptable Ainsi, l'aération affecte fortement la distribution du climat qui règne dans la serre. Or une distribution hétérogène des variables microclimatiques dans une serre engendre elle-même une hétérogénéité de la production, notamment en termes de qualité. L'efficacité de l'aération joue donc un rôle prépondérant à la production (Bartzanas et al.2004) [13]

I.2.5.10.Hétérogénéité climatique :

L'hétérogénéité climatique des serres a un effet important sur la variabilité de l'activité des cultures, notamment sur la transpiration et la photosynthèse. Cette hétérogénéité pourrait être particulièrement forte dans les serres plastiques de type tunnel. Les transferts radiatifs et convectifs contribuent principalement à cette hétérogénéité. Quelques études (Haxaire et al ; 1999)[11]ont mis en évidence cet aspect et ont comparé des données mesurées et simulées, aussi bien sous ciel dégagé que sous ciel nuageux.

I.2.5.11.Le revêtement :

- Le film souple laisse parfaitement passer la lumière et retient bien la chaleur. C'est le revêtement le plus économique mais il devient jaune et cassant au bout de trois à quatre ans et doit donc être régulièrement remplacé.
- Le plastique est vendu sous forme de grandes feuilles légères et projette donc peu d'ombre.

- Il est aussi le plus hermétique des revêtements, donc le meilleur conservateur de chaleur. Il est cependant difficile à nettoyer.
- Le verre est parfaitement indiqué pour une serre pour ses qualités de transparence, sa durée de vie et sa facilité de nettoyage. Mais il est relativement lourd et fragile, donc potentiellement dangereux notamment pour les enfants, à moins d'être du verre trempé [17].

I.3.la technologie dans les Serres agricoles :

Il existe de nombreuses techniques et annexions modernes, qui sont incluses dans les serres pour contrôler les conditions climatiques dans la serre et pour fournir une atmosphère adaptée aux plantes agricoles, dans le but d'obtenir une production agricole supérieure à la normale. Exemple : la ventilation, chauffage, les systèmes de refroidissement…etc.

I.3.1.Ventilation :

Depuis l'invention de la serre, l'homme a mis au point une solution pour la ventilation des serres par des fenêtres avec différentes formes et tailles, ont été placées en fonction des besoins des plantes et de la forme de la serre. Il y a deux méthodes de ventilation d'une serre :

I.3.1.1. Ventilation traditionnelle et naturelle :

La ventilation naturelle est le système le plus économique pour réguler le microclimat interne de la serre. Il s'agit des ouvrants disposés sur la structure. Les ouvertures doivent représenter environs 20% de la surface au sol et avoir un angle d'ouverture assez important pour permettre à l'air de bien circuler. Par le toit, une installation de l'ouvrant côté Nord est préconisée, les ouvertures au plafond permettent à l'air de se mélanger correctement dans la serre.

Ne négligez pas les ouvertures sur les côtés au niveau des plantes qui augmenteront l'efficacité de l'ouvrant du toit et qui moduleront la ventilation. La circulation de l'air sera alors optimale, créant un circuit interne autorégulé.

Au printemps et en été on peut bien évidemment, ajouter l'ouverture totale des portes pour faire encore baisser la température interne [13].

I.3.1.2.Ventilation développée :

La ventilation forcée nécessitera une installation électrique spécifique dans la serre : boîtiers électriques avec protection des circuits, démarreurs, lignes, canaux électriques … Par la suite vous pourrez installer votre ventilateur : Il s'agit habituellement de ventilateurs de type hélicoïdal avec des persiennes, fonctionnant en mode extracteur d'air.

Par son action ces types de ventilateurs fournissent le renouvellement du volume d'air logé dans la serre et permettent l'extraction du CO2 et le rééquilibrage du climat général.

Ces ventilateurs doivent de préférence être installés à l'opposé des vents dominants.

Ce type d'installation est adéquat pour suppléer le fonctionnement de l'aération naturelle dans les serres, garantissant l'aération à des moments déterminés pendant lesquels les conditions environnementales ne conviennent pas aux cultures (fort enneigement empêchant l'ouverture, vent violent) [13].

I.3.2.Chauffage de Serre:

Pour maintenir la température nécessaire à la survie des plantes, il faut installer un système de chauffage dans la serre. Il aura un rôle soit d'antigel en maintenant la température vers 2° C au minimum soit de chauffage au sens strict du terme pour obtenir une ambiance tempérée ou tropicale dans la serre. Le système de chauffage doit être suffisamment puissant pour atteindre et maintenir efficacement la température choisie. Quant à l'énergie utilisée, tout dépend de région climatique, des frais d'installation et des coûts d'utilisation compte tenu du système de chauffage qui équipe la serre [14].

I.3.2.1.Le chauffage au gaz :

Le chauffage au gaz s'avère très efficace dans la serre. Le gaz de ville étant naturellement exclu car son installation serait chère et compliquée, même le butane est inefficace car il est trop sensible au gel, donc il est mieux d'utiliser du propane, qui lui ne gèle pas, toutes les bouteilles de gaz doivent être sorties de la serre pour éviter tout risque d'explosion par surchauffe.

Il faut aussi surveiller avec plus d'attention l'aération de la serre car la combustion du propane dégage de la vapeur d'eau. S'il est mal réglé, il peut également émettre des vapeurs toxiques pour les plants [14].

I.3.2.2.Le chauffage à pétrole :

Le chauffage à pétrole est efficace mais peu précis. Economique et totalement autonome, il permet de gagner quelques degrés, Il faut aussi surveiller tous les jours le niveau de pétrole dans les réservoirs [14].

I.3.2.3.Le Chauffage électrique :

Le chauffage électrique est non contaminé mais coûteux et inefficace dans les grandes serre, donc il n'est pas utilisé beaucoup dans les grandes serres.

Afin de contrôler le chauffage de la serre, il C'est mieux a choisissez un schéma pour déterminer le nombre de chauffage nécessaire pour la taille de la serre, et installé dans des endroits très précis, pour assurer la meilleure diffusion de la chaleur, Comme nous le savons, la chaleur en haut sera plus élevée en bas. Il est donc recommandé de laisser passer de petits ventilateurs en haut pour transférer l'air chaud et la distribution partout.

I.3.3.Systèmes de refroidissement :

Il existe plusieurs méthodes de refroidissement utilisées dans les serres. Nous expliquerons certaines méthodes de refroidissement.

I.3.3.1.Rideaux d'ombrage :

Les rideaux thermiques peuvent être utilisés pour ombrager la serre et limiter l'augmentation de la température à l'intérieur de celle-ci. Les rideaux thermiques peuvent réduire la température jusqu'à 6°C lorsque comparés à une serre qui n'utilise pas de rideaux thermiques (NGMA, 1996). Par contre, l'utilisation de cette technique réduit la luminosité qui est nécessaire à la photosynthèse. En climat canadien, le rideau thermique est plutôt utilisé pour réduire la consommation énergétique dans les serres au cours de l'hiver. Le rideau thermique peut être utilisé pour ombrager la serre en temps chaud et ensoleillé ou pour réduire la consommation énergétique d'une serre durant la nuit. La Figure 3 représente un rideau thermique déployé à 50 % dans une serre, au cours d'une journée ensoleillée. La configuration optimale d'un rideau thermique dans une serre dépend du besoin du producteur [15].

I.3.3.2.Panneaux humides de refroidissement (Cooling Pad) :

Cette méthode de refroidissement consiste à faire circuler de l'eau froide dans un panneau de cellulose à base de plastique ou à base de cellulose ayant reçu un traitement spécifique, combinée à des ventilateurs d'extraction d'air mécanique. Les panneaux de refroidissement sont installés dans une section de murs, idéalement, celle qui est exposée aux vents dominants. La Figure 4 représente une installation de panneaux de

Refroidissement du côté extérieur du mur de la serre.

Ces panneaux de refroidissement sont utiles lorsque le climat extérieur est chaud et sec. Ils permettent le refroidissement adiabatique de l'air de la serre, en utilisant l'air chaud à faible teneur en eau de l'extérieur. En évaporant l'eau du panneau de refroidissement humide, l'air chaud de l'extérieur devient froid et à haute teneur en eau, contribuant à abaisser la température ambiante de la serre. La Figure 5 représente le fonctionnement des coussinets de refroidissement [15].

I.3.3.3.Brouillard Basse Pression (Fog System):

Le brouillard basse pression (Figure I.15 : Fog System) suit le même principe avec une taille de gouttelettes supérieures et moins nombreuses. La conséquence: une humification plus importante. Il est principalement utilisé pour des plantes robustes qui ne craignent pas d'être humidifiées sur leur feuillage ou leurs fruits [16].

I.4.Conclusion :

Le choix du type et de la structure de la serre dépend du climat de la région et du type de plante à cultiver dans cette serre.

Dans ce chapitre nous avons vu les types de serres agricoles les plus populaires, ensuite nous avons déterminé les paramètres les plus agissants sur la croissance de la culture sous serre, enfin nous avons défini les différents systèmes automatique nécessaires à la gestion efficace des paramètres climatiques sous serre.

Pour fournir le meilleur climat possible aux plantes en s'appuyant sur une bonne connaissance de leurs caractéristiques et de leurs besoins à tous les stades de leur croissance et en choisir les meilleures technologies dans les serres.

CHAPITRE II

MODELISATION D'UNE SERRE AGRICOLE

II.1.Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'ensemble des outils matériels et logiciels utilisés pour l'obtention d'un modèle dynamique dans une serre agricole.

L'objectif scientifique de notre travail est l'introduction de l'analyse du bilan énergétique des serres en Algérie et de compléter les diverses approches théoriques dans le domaine par un modèle simple inspiré des modèles classiques proposés dans la littérature.

Ce modèle est basé sur des équations théoriques qui intègrent l'ensemble des processus d'échanges thermiques entre la couverture, l'air intérieur et le sol. Les particularités de ce modèle sont les suivantes: (i) il effectue une analyse globale des différents bilans thermiques échangés avec une analyse des échanges infrarouges de grande longueur d'onde, (ii) il se base essentiellement sur des données réelles facilement mesurables dans la serre et son environnement, (iii) il est capable de représenter le phénomène d'inertie thermique du sol.

Enfin nous avons que la serre est soumise à trois perturbations essentielles, qui sont le rayonnement solaire, la température extérieure et l'humidité extérieure.

II.2.Description du modèle :

Les serres agricoles constituent un système biologique et énergétique complexe dans Lequel la plupart des modes de transfert thermiques sont mis en jeu. Les conditions climatiques au voisinage du sol résultent des échanges de chaleurs et de masse entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Ainsi l'agro système serre peut-être décrit à partir des transferts d'énergie et de masse. Ces transferts peuvent s'effectuer sous trois formes différentes par rayonnement, convection et conductions.

- **II.2.1.Les échanges radiatifs**

Le rayonnement solaire constitue une source d'énergie naturelle faisant chauffer le système terrestre. La partie qui nous parvient se situe dans une bande spectrale grossièrement comprise entre 0.3 et 2.5µm de longueur d'onde.

- **II.2.2.Les échanges convectifs**

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

- **II.2.3.Les échanges conductifs**

Concernent essentiellement les transferts thermiques entre la surface du sol et les déperditions thermiques à travers les parois ou les vitres. La modélisation et l'établissement du modèle

mathématique, traduisant les phénomènes considérés, aboutissent alors à la résolution d'un système d'équations, ici par des méthodes numériques considérées.

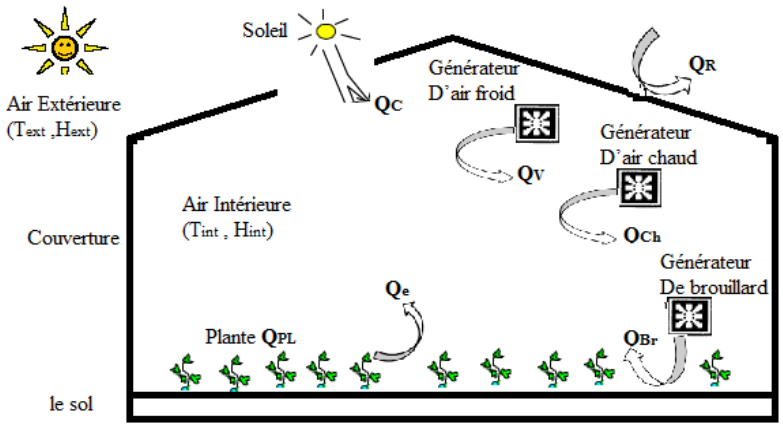


Figure II.1 : Description énergétique de la serre.

• 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 Tint, et son humidité a Hint.

• La géométrie de la serre de la figure 2.2 est définit par sa longueur L, sa largeur l, son volume V, et la hauteur h.

II.3.Bilan énergétique

II.3.1.Bilan d'énergie au niveau de l'air intérieur :

L'air intérieur échange de l'énergie par convection, avec la couverture et le sol , et par fuites avec l'air extérieur, on considère qu'il n'y a pas d'échange radiatif et la température de la couverture est homogène.

› 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.

II.3.2.Bilan de la couverture extérieure :

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.

II.3.3. Bilan sur le sol :

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).

II.4.Température du sol :

Cette étude concerne l'exploitation de la chaleur de la terre (géothermie) pour le chauffage des serres agricoles dans le but d'augmenter leur rendement. La modification du climat intérieur de la serre est relié aux différents paramètres qui ont une influence sur l'humidité et la température durant la période de chauffage et donc sur le développement de la plantation durant son évolution. La mesure de la température et de l'humidité durant la période de chauffage s'effectue pour deux considérations différentes : l'air intérieur n'emmagasine pas de chaleur sous ses deux formes : chaleur sensible et latente. La température de l'air intérieur, en tenant compte de son inertie thermique, ne varie pas considérablement par rapport à celle mesurée sans tenir compte de l'inertie thermique, tout en sachant que la serre est une unité dépendante des variations du climat extérieur et varie continuellement avec celui-ci. L'augmentation du rendement de la serre chauffée, comparativement à la serre non chauffée, a été bien illustrée dans cette étude. Il serait donc fort utile de généraliser ce thème de recherche de grande importance sur le plan économique, en tenant compte de son impact sur l'environnement.

II.5.Méthode sur une journée de référence :

[20]

Nous faisons une expérience dans une période de 24 heures où les conditions météorologiques coïncident, On peut représenter la température du sol de la serre selon la série de Fourier suivante :

$$Ts(0,t) = \prec T(0) \succ + \sum_{n=1}^{n=N} [(a_n \cos(n.w.t) + b_n \sin(n.w.t)] \quad (2.1)$$

Avec :

t : le temps.

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

W : pulsation des oscillations $(2.\frac{\pi}{T})$(s^{-1}).

$\prec T_S(0) \succ$: La température moyenne de la surface du sol.

an, bn : coefficients d'ordre n de la décomposition en série de fourier.

Lorsque la température du sol commence à évoluer à partir de l'état initial $T_S(x, 0)$, on peut considérer que $T_S(x, t)$ est la solution de l'équation de diffusion de la chaleur à l'intérieur de la serre en milieu semi-fini et en régime variable .

$$\frac{dTs\,(x,t)}{dt} = a.\frac{d^2Ts(x,t)}{dx^2} \quad (2.2)$$

Avec :

x : La profondeur (m).

t : temps (s).

a : diffusivité du sol (m^2/s).

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

$$Ts(x,t) = Ts1\,(x,t) + Ts2(x,t) \qquad (2.3)$$

Le premier terme, TS1(x, t) est périodique de période égale 24h, son amplitude décroît exponentiellement avec la profondeur x.

$Ts1(x,t) = \prec Ts(0) \succ + \sum_{n=1}^{n=N}[(a_n.\cos(n.w.t - x.\alpha.n^{0.5} + b_n \sin(n.w.t -$ x.α.$n0.5$].e−x.α.$n0.5$(2.4)

$$Avec : \alpha = \left(\frac{w}{2.\alpha}\right)^{0.5} (m^{-1})$$

Le deuxième terme, TS2(x, t), est un terme transitoire qui tend à s'annuler asymptotiquement

$$Ts2\ (x,t) = Ts(x,0) - \prec Ts(0) \succ :. \frac{x}{(\pi.\alpha.t)^{0.5}} (2.5)$$

En régime permanent, la température du sol dépend du premier terme $T_{S1}(x, t)$, et la température moyenne en tout point du sol est égale à la température du sol <Ts (0)>,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.

Le premier terme $T_{S1}(x, t)$ à partir duquel la profondeur x peut être déterminée, à partir de laquelle les variables de température de surface peuvent être réduites n fois.

$$X = \frac{ln(n)}{\alpha} \quad (m) \qquad (2.6)$$

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
Ts1 (x, t).

II.6.Modèle énergétique de la serre agricole

Depuis près de trente ans, la littérature spécialisée fait l'état d'un grand nombre detravaux de modélisation destinés à appréhender les phénomènes énergétiques qui régissent le climat intérieur des serres agricoles. [22][21]

Le modèle est constitué de quatre composantes essentielles: échangeur de chaleur, plantes, l'air intérieur et le sol. 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 :

$$\rho.cp\ .v_T.\frac{dT_{int}}{dt} = Q_{PL} + Q_{CH} + Q_R - Q_v - Q_C - Q_e - Q_{BR} (2.7)$$

$$\rho.v_H.\ \frac{dH_{int}}{dt} = H_{PL} + H_{BR} - H_{air,int} + H_{air,ext} + H_e (2.8)$$

Avec :

ρ: La densité de l'air [kg.m-3].

C_P: La chaleur spécifique de l'air [J.kg-1.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 [0C].

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

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

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

$H_{air,int}$,$H_{air,ext}$,He : 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 [kg.h-1].

Remarquer :[23] [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 susceptible 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).

II.6.1.La chaleur produite par des plantes :

Comme les animaux, certaines plantes produisent de la chaleur. Leur température s'élève jusqu'à parfois 40 °C au-dessus de celle de l'air ambiant. Cette thermogenèse joue surtout un rôle dans les différentes étapes de la pollinisation.

le nombre de plante N sont données par :

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

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

Avec :

$$Q_{PL} = \ 0.096 N_{PL}[0.8\ - 1.85 * 10 - 7(T_{int}\ -\ 10\ )4]\ (2.10)$$

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

Remarquer:

A l'équilibre thermique QPL négligeables devant le générateur de l'air chaud et dans une serre de grande taille.

II.6.2.La chaleur perdue par l'évaporation de l'eau

La perte de chaleur peut être calculée par l'évaporation de l'eau selon l'équation suivante :

$$Qe = \lambda . He$$

$$He = f_e(T_{int}, H_{int}) = 1.2\, K_e A_e\, [3{,}9.103.\, e^{(\frac{T_{int}}{15.2})} - H_{int}] \qquad (2.12)$$

λ: La chaleur latente d'évaporation [kj.kg-1].

Ke :Le coefficient d'évaporation qui est en fonction de la vitesse du vent *air v* [kg.h-1].

Ae : La surface évaporée (m2).

Ke = 0.223 1.149. $g_e(v_{air})$ (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.[25]

II.6.3.La chaleur perdue par l'humidificateur :

[27] [26]

A' définit comme suit :

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

- Si on a une serre de surface inférieure à 100m2 (petite serre) on peut considéréQe et He de l'équation (2.12) comme des perturbations externe de notre modèle.
- Les pertes de chaleur dues au système de brouillard QBr sont liées à la capacité de l'eau du système de brouillard HBr (taux de vaporisation de l'eau par le système du brouillard).

II.6.4.La chaleur perdue par le système de ventilation :

[27]

La perte de chaleur du système de ventilation Q_V peut être calculée selon une fonction linéaire qui est la différence entre la chaleur interne et externe selon l'équation suivante (2.15) :

$$Qv = f_v(T_{int}, T_{ext}, V_{vt}) \approx \rho . C_p . V_{vt}\, (T_{int} - T_{ext}) \qquad (2.15)$$

V_{vt} : Taux de ventilation totale.

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

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

En effet, le taux de ventilation Vv,f dépend de la vitesse du vent.
Par conséquent, l'équation (2.16) prend la forme suivante :

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

II.6.5.La chaleur transféré par la couverture : [27]

Les radiations solaires transmises à travers la couverture de la serre et reçues par le couvert végétal sont converties en chaleurs sensible et latente. Les déperditions thermiques à travers la couverture et les ouvrants d'aérations sont prises dans le bilan 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-1].

II.6.6.La chaleur produite par le soleil :

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

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

Avec :
Af : la surface au sol (m2).
a : l'efficacité du condensation de la chaleur solaire=0.28.
Si : le rayonnement solaire incident (W/m2).
R : la chaleur produite par le soleil (W).

II.7.Humidité intérieure et extérieure de la serre : [27]

L'humidité de l'air est un des facteurs importants très difficile à contrôler.

Les niveaux d'humidité fluctuent en fonction de la température en serre, plus celle-ci est élevée et plus l'air peut être humide.

De plus, les plantes transpirent ce qui rajoutent de la vapeur dans la serre. En effet les plantes en poussant, absorbent de l'eau par la racine et la rejettent sous forme de vapeur d'eau par leurs pores.

Il peut être traduit selon l'équation suivante :

$$H_{air,ext} = f_{ext}(V_{vt}, H_{ext}) \approx V_{vt}.H_{ext}$$

$$H_{air,int} = f_{int}(V_{vt}, H_{int}) \approx V_{vt}.H_{int} \quad (2.20)$$

Hext, Hint : 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 :

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

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

II.8.Taux d'évapotranspiration des plantes E(R,Hint) : [21]

L'évapotranspiration décrit le transport de l'eau depuis la surface vers l'atmosphère, soit la somme de l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes.

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

$$ht = 1.65.LAI.(1 - 0.56.e^{-(\frac{R}{1.32})})\ [w.m20.k-1]$$

En remplace ht dans E(R, Hint) :

$$E(R, H_{int}) = \frac{0.154.Ln(1 + 1.1.LAI^{1.13})}{2.3.10^6}.R + \frac{1.65.LAI.(1 - 0.56.e^{-\left(\frac{R}{1.32}\right)})}{2.3.10^6 . 66} H_{int}$$

$\lambda = 2.3.106\ j.kg^{-1}, \gamma = 66 = \frac{R}{M_{H2O}}.\frac{C_p}{\lambda}.\rho[Pa/k]$.

ht : Enthalpie spécifique de l'air.

γ: Constante psychométrique [kj.kg-1 air sec]

$E(R, H_{int}) = \frac{\alpha}{\lambda} R + \beta t. H_{int}$[28] (2.23)

Où : $\alpha = 0.154.Ln(1+1.1.LAI^{1.13})$[29]

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 :

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

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

$H_{tot} = H_{Br} + H_{PL} + H_e$ (2.24)

$H_{PL} + H_e = E(R, H_{int})$[28]

Donc :

$H_{tot} = H_{Br} + E(R, H_{int})$

E(R, Hint) : le taux évapotranspiration des plantes.

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

$$\rho. Cp_p. V_t \frac{dT_{int}}{dt} = Q_{Ch} + Q_R - Q_v - Q_C - Q_{Br}$$

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

Notre modèle peut finalement décrie comme suit :

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

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

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 :

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{\rho.\mathrm{Cp}.\mathrm{Vt}}(Q_{Ch} + R - \lambda.H_{Br}) - \frac{\mathrm{Vv,m}}{\mathrm{Vt}}(T_{int} - T_{ext}) - \frac{UA}{\rho.\mathrm{Cp}.\mathrm{Vt}}(T_{int} - T_{ext}) \quad (2.25)$$

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

Les variables Text, Hext et R représentent des perturbations extérieures de la serre qui déterminent l'influence atmosphérique sur Tint et Hint.

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 décrie 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.

II.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 ».

II.10.Modèle dynamique du climat d'une serre agricole : [30]

Le modèle dynamique peut être représenté selon les équations suivantes :

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

Avec :

$X \epsilon R^n$: Vecteur d'état.

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

$V \epsilon R^d$: 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 :

$$Y_i^{ri} = fi(x, v) + g_i^T(x, v)U, \quad i = 1,2, \ldots \ldots p \qquad (2.28)$$

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

La matrice D(X,V), est donnée par :

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

D(x, v) : Matrice non singulière.

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

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

Avec:$\hat{u}_i$: i=1,2,.., p : Ensemble d'entrées externes, rend le système en boucle fermée E/S linéaire et découplé avec perturbation d'isolement ayant la forme suivante : [31]

$$y_i^{ri} = \hat{U}_i \qquad (2.30)$$

Remarquer :

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.

Evidemment, le système en boucle fermée (2.30) peut être maintenant commandé enajoutant 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 :[32]

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

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

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.

II.10.1.Modèle de commande de la serre :[34]

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 :

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{\rho.\mathrm{Cp.V}}(Q_{Ch} + R - \lambda.H_{Br}) - \frac{\mathrm{Vv,m}}{\mathrm{V}}(T_{int} - T_{ext}) - \frac{UA}{\rho.\mathrm{Cp.V}}(T_{int} - T_{ext}) \quad (2.32)$$

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

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

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

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

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{\rho.\mathrm{Cp.V}}(R - \lambda.H_{Br}) - \frac{\mathrm{Vv,m}}{\mathrm{V}}(T_{int} - T_{ext}) - \frac{UA}{\rho.\mathrm{Cp.V}}(T_{int} - T_{ext}) \quad (2.35)$$

$$\frac{dH_{int}}{dt} = \frac{\beta\mathrm{t}}{\rho.\mathrm{V}}H_{int} - \frac{1}{\rho.\mathrm{V}}H_{Br} + \alpha\frac{\mathrm{R}}{\lambda\mathrm{V}} - \frac{\mathrm{Vv,m}}{\rho.\mathrm{V}}(H_{int} - H_{ext}) \quad (2.36)$$

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

$$X = [X_1 X_2]^T \widehat{=} [T_{int} H_{int}]^T ; Y = X ; r1 = r2 = 1$$

$$U = [U_1 U_2]^T \widehat{=} \left[V_{v,m} H_{Br}\right]^T$$

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

Ces variables de perturbations du modèle d'aération (chauffage/ refroidissement) dela 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 BT qui peut être considéré constant.
Par conséquent, dans ce cas, la linéarisation combinée de feedback avec feedforwardest possible.

II.11.Modèle Commande de ventilation et de brouillard :

Nous pouvons appliquer la méthode de contrôle de la ventilation et de l'humidité à travers la matrice D(X, V) comme suit :

$$D(X,V) = \begin{bmatrix} \rho.\mathrm{Cp.V} & \rho.\lambda.\mathrm{V} \\ -\rho.\mathrm{Cp.V(V3-X2)} & \rho^2.\mathrm{Cp.V(V2-X1)} \end{bmatrix}$$

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 U1 (t) affecte les états du système X1 (t) et X2 (t), avec exactement la même manière que U2 (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)

$$U1 = Q^{-1}[\frac{\rho.\mathrm{Cp.V}}{\tau_1}\tilde{u}_1 + \frac{\rho.\lambda.\mathrm{V}}{\tau_2}\tilde{u}_2 - (\alpha+1)V1 - UA * V2 + (UA - \frac{\rho.\mathrm{Cp.V}}{\tau_1})X_1$$

$+ (\lambda\beta_t - \frac{\rho.\lambda.V}{\tau_2})\, X_2]$ (2.37)

$$U2 = Q^{-1}(V_3 - X_2)[-\frac{\rho.Cp.V}{\tau_1}\tilde{u}_1 + V1 - (UA - \frac{\rho.Cp.V}{\tau_1})X_1 + UA * V_2]$$
$$+ Q^{-1}(V_2 - X_1)\,[\frac{\rho.\lambda.V}{\tau_2}\tilde{u}_2 - \frac{\alpha.\rho.Cp}{\lambda}V_1 + \rho.Cp.V\,(\frac{\beta t}{V} - \frac{\rho}{\tau_2})\,X_2]$$ (2.38)

Avec : $Q = \rho.Cp\,(V_2 - X_2) + \lambda\,(V_3 - X_2)$

II.13.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé une serre, dans laquelle se trouvent tous les processus impliqués dans la chaleur, l'air intérieur et extérieur, la végétation et les échangeurs de chaleur : conduction, évaporation, condensation et rayonnement solaire.

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 III

STRATEGIE DECOMMANDE ET SIMULATION PAR CONTROLEUR PDOF

III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous discutons de l'amélioration du modèle dynamique détaillé dans le chapitre précédent d'une serre afin de contrôler son environnement interne.

Dans un premier temps, nous allons présenter les contrôles avec lesquels nous allons travailler, qui sont les contrôleurs dynamiques après PID, PDF et le contrôleur de flou.

Ensuite, nous simulerons la température interne et l'humidité en utilisant le logiciel MATLAB, l'outil SIMULINK et en utilisant les contrôleurs dynamiques PD0F,

III.2.Schéma synoptique de la serre agricole :

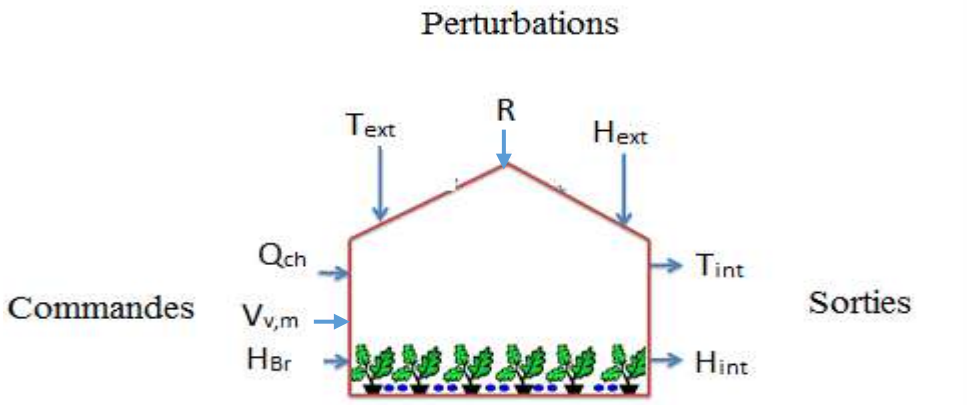


Figure III.1: Schéma synoptique de la serre agricole.

Les entrées commandes :

• QCh : La Chaleur fournie par le système du chauffage de la serre (w).

• Vv,m : Le taux de ventillation (m3/s).

• HBr : Le teaux d'évaporation de l'eau du système de brouillard (kg/h).

Les perturbations :

• R : L'énergie solaire radiante (w).

• Text : La température exterieure (°C).

• Hext : L'humidité exterieure (%).

Les sorties :

• Tint : La température intérieure (°C).

• Hint : L'humidité intérieure (%).

III.3.Regulateur PID :

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients G, Td et Ti afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précis. Il faut pour cela limiter le ou les éventuels dépassements.

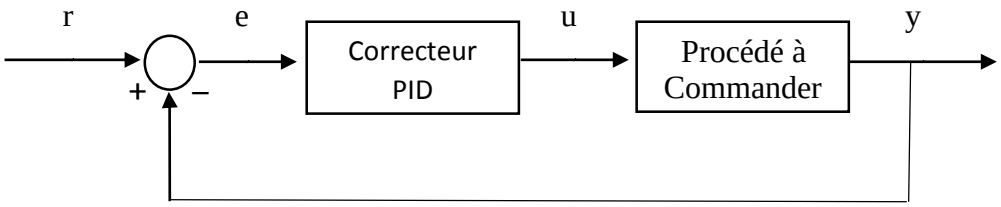


Figure III.2: Schéma de commande avec correcteur de PID.

Avec :

• r : la consigne désirée.

• y : le signal de sortie acommander.

• e : l'erreur entre la cosigne et le signal de sortie.

• u : le signal de commande du procédé.

III.3.1.Description du correcteur :

Proportionnel Intégral Dérivé c'est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de contrôler un grand nombre de procédés. L'erreur observée est la différence entre la consigne et la mesure. Le PID permet 3 actions en fonction de cette erreur :Une action Proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain GUne action Intégrale : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps s, puis divisée par un gain Ti Une action Dérivée : l'erreur est dérivée suivant un temps s, puis multipliée par un gain Td Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les 3 effets (série, parallèleou mixte).

III.4. Régulation par le contrôleur PDF (Pseudo-Dérivative Feedback Contrôler)

Les contrôleurs PDF sont structurés à l'aide de la technique FPA et l'efficacité du contrôleur proposé est testée dans un système d'alimentation thermo-thermique dérégulé à deux zones pour une large gamme de demandes de charge et de perturbations dans des conditions de fonctionnement différentes. Les différentes sorties simulées montrent que les performances du contrôleur PDF basé sur FPA sont rapides, plus précises et meilleures que les résultats simulés avec les contrôleurs PI et PID. L'unité HES est incluse dans la zone 1 afin d'améliorer les performances du système. On voit clairement que dans tous les cas (basé sur le poolco, sur la base bilatérale et sur la violation de contrat), la variation de fréquence devient nulle en régime permanent avec moins de temps de réglage en raison de l'application coordonnée des unités HES qui assure l'exigence primordiale de l'AGC. De plus, le contrôleur PID proposé avec système AGC a des unités HES qui démontrent de meilleures performances pour assurer l'amélioration du PSRI afin d'offrir un temps de restauration inférieur avec une fiabilité améliorée du système.

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

• le contrôleurPID Assurer une réponse acceptable pour des signaux de consigne définis en fonction du temps.

• le contrôleurPID Fournir des caractéristiques fréquentielles (gain, déphasage) demandées dans une bande de fréquences.

• Les contrôleurs de PDF peuvent réaliser l'amortissement critique avec un temps deStabilité 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.

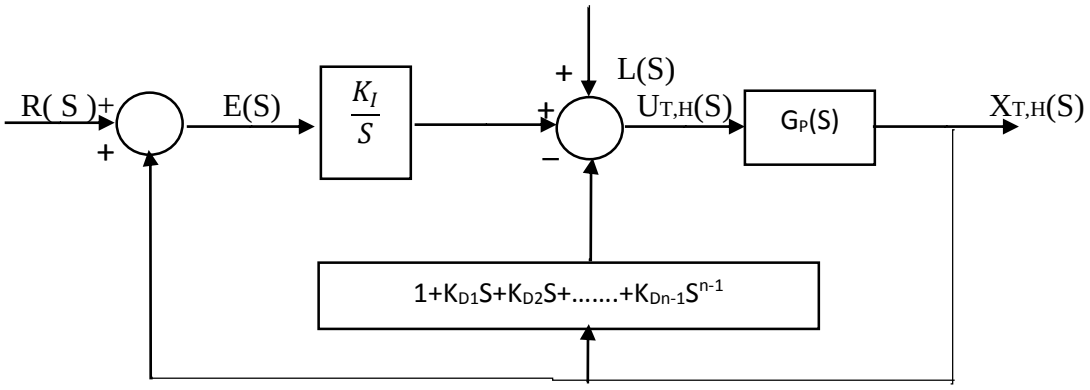


Figure III.3: Structure générale de la commande PDF

III.5.Méthode de traitement :

Afin d'obtenir les nouvelles commandes ut et uh qui rendent le système linéaire et discret, les lois de commande doivent être appliquées à ces relations (2.25) et (2.26), le produit d'un système en boucle fermée sera linéaire et fermé, et il nous donnera le modèle suivant :

$$\dot{x_T}(t) = -\frac{UA}{\rho.\mathrm{Cp.V}} + \widetilde{K_T}\widetilde{U_T}(t) \quad (3.2)$$

$$\dot{x_H}(t) = -\frac{\beta t}{V}x_H(t) + \widetilde{K_H}\widetilde{U_H}(t) \quad (3.3)$$

Afin de mesurer la température et l'humidité à l'intérieur de la serre, un hygromètre et un thermomètre doivent être placés, et il doit y avoir une distance entre eux et les ventilateurs de la serre et le système de brouillard, et il peut y avoir un grand retard indiqué par les jauges , de sorte que le changement de température et d'humidité peut être déterminé Après un délai d_T et d_H(dT <dH) donné, avec cette observation, la fonction de transfert suivante peut être suivie :

$$X_T(s) = \frac{K_T . e^{-d_T S}}{\tau_T s+1}\widetilde{U_T}(s) \equiv G_T(s)\,\widetilde{U_T}(s) \quad (3.4)$$

$$X_H(s) = \frac{K_H . e^{-d_H S}}{\tau_H s+1}\widetilde{U_H}(s) \equiv G_H(s)\widetilde{U_H}(s) \quad (3.5)$$

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

$\tau_T = \frac{\rho.\mathrm{Cp.V}}{UA}$, $\tau_H = \frac{\mathrm{V}}{\beta t}$, $K_T = \frac{\rho.\mathrm{Cp.V}}{UA}\widetilde{K_T}$, $K_H = \frac{\mathrm{V}}{\beta t}\widetilde{K_H}$

En été, le refroidissement par évaporation est faible βt L'indice dans les résultats de l'équation (2.23) est relativement faible.

On peut donc s'en passer, de sorte que l'équation (2.26) est parfaite, et à partir de là les relations (3.3) et (3.5) deviennent de la forme suivante :

$$\dot{x}_H(t) = \widetilde{K}_H \widetilde{U}_{\mathrm{H}}(t) \quad (3.6)$$

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

La température est contrôlée sur la base des équations (3.4) et (3.7) par un contrôleur de premier ordre et l'humidité peut être contrôlée par intégration, et maintenant nous pouvons contrôler l'humidité et la température séparément en utilisant plusieurs types de dispositifs de contrôle, et dans notre étude on s'appuie sur (PDF) (pseudo dérivé feedback Controller).

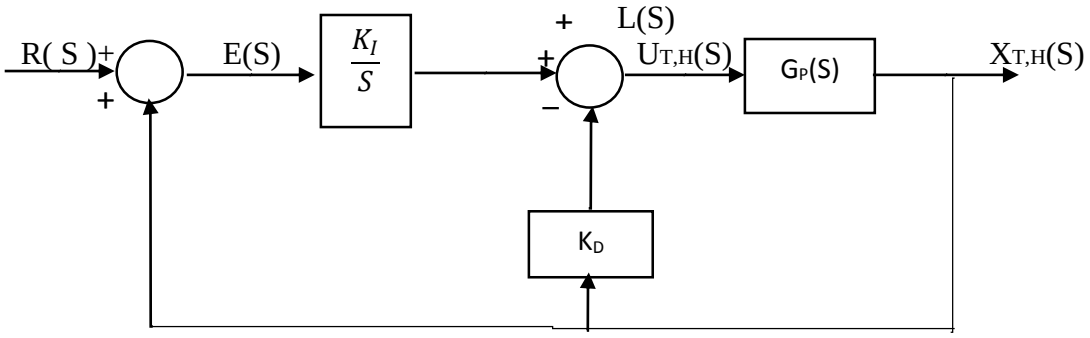


Figure III.4: Structure de la commande de PD0F appliquée au modèle de processus.

Le contrôleur de rétroaction pseudo-dérivée (PDF) a d'abord été développé par Phelan (1977) et plus tard étendu et appliqué au contrôle de la température des serres par Setiawan et al. (1998). Il s'agit d'une modification du contrôle intégral avec un algorithme de rétroaction dérivée (I-DF). Cette structure fournit tous les aspects de contrôle du contrôle proportionnel intégral dérivé (PID) mais sans les zéros du système qui sont normalement introduits par un compensateur PID. Phelan (1977) l'a nommé structure de contrôle PDF du fait que le taux du paramètre mesuré est renvoyé sans avoir à calculer une dérivée. Dans la présente demande, nous concentrons notre attention sur le cas le plus simple possible de la structure de commande PDF générale, illustrée à la Fig. 3.5 Ce schéma de rétroaction est appelé structure de commande à rétroaction pseudo dérivée nulle (PD-0F). Le seul critère de "conception" de performance retenu est l'affectation des constantes de temps des deux découplés sous-systèmes.

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 GCL(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 :

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

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

III.6. Régulation par le contrôleur PD0F :

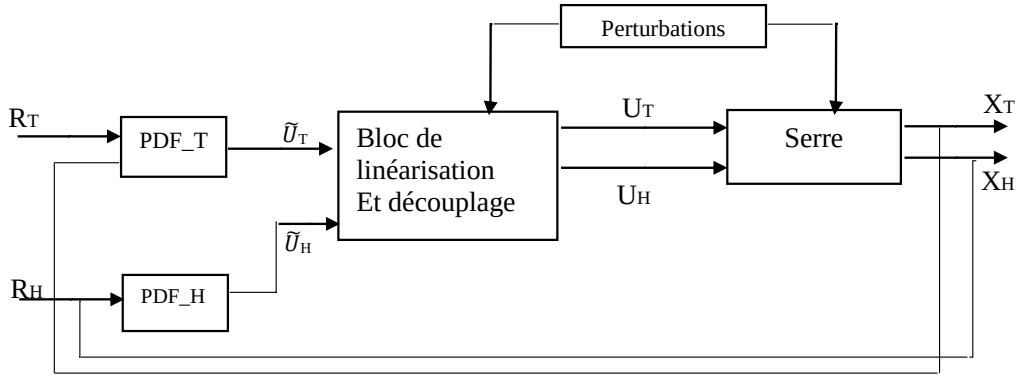


Figure III.5: Stratégie globale de la commande

Nous avons développé un système de contrôle pour le fonctionnement de la serre. Un modèle de lois thermodynamiques non linéaires entre de nombreuses variables du système affectant le climat de la serre a été formulé et un contrôleur PD0F est conçu. Le système a été validé par simulation.

Les capteurs et les actionneurs du système se sont comportés de manière raisonnable et ont répondu rapidement aux changements de conditions tels que le climat extérieur prédéterminé et les objectifs de climat intérieur.

Ainsi, les lectures de signal du système pourraient être utilisées comme critères pour les défaillances des capteurs et actionneurs réels. Le contrôle approprié et opportun et la détection des pannes des capteurs et des actionneurs contribueront au fonctionnement efficace et efficient de la serre. Les réponses désirées peuvent être décrites par les modèles suivants : [34]

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

$\lambda_T et \lambda_H$ 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 :

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

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

$\lambda_T \succ 10 dT et \lambda_H \succ 10 dH$

Ce réglage est simple mais très imparfait, car pour obtenir des résultats satisfaisants, λ_T et λ_H doivent être beaucoup plus grands, λ_T> 10dT et λ_H> 10dH, et donc on obtient une réponse plus rapide.La méthode dépend des calculs des paramètres de le système en boucle fermée. Cette méthode est la suivante :

Sur la base de (3.12), relations (3.9) et (3.10) et les réponses désirées peuvent être comme suit : [34]

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

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

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

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

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

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

$$K_{D,T} = \frac{\tau_T}{d_T.\mathrm{K}_{I,T}} - \frac{{\tau^2}_{T,2}\,(d_T + \tau_T)}{d_T K_T(2.d_T\xi_{T,2}\tau_{T,2} + {\tau^2}_{T,2} + d_T^2)}$$

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

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

$$K_{D,H} = \frac{1}{d_H.\,\widetilde{K}_H} - \frac{{\tau^2}_{H,2}}{d_H\widetilde{K}_H(2.d_H\xi_{H,2}\tau_{H,2} + {\tau^2}_{H,2} + d_H^2)}$$

$$K_{I,H} = \frac{1}{\widetilde{K}_H(2.d_H\xi_{H,2}\tau_{H,2} + {\tau^2}_{H,2} + d_H^2)}$$

Remarquer :

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 (Tint , Hint) et de perturbation.

III.7.Simulation :

Nous allons simuler la réponse du système (serre) via le logiciel de programmation Matlab, et également via le contrôleur PD0F et le contrôleur foue.

III.7.1 Régulation de la température et de l'humidité par contrôleur PDOF

III.7.1.1 Schéma fonctionnel

Nous allons représenter les équations (2.35) et (2.36) sous forme de blocs dans la librairie SIMULINK, comme le montre la Figure 3.7 ci-dessous, et des nouvelles commandes feedback/ feedforward donnant des réponses dans la serre.

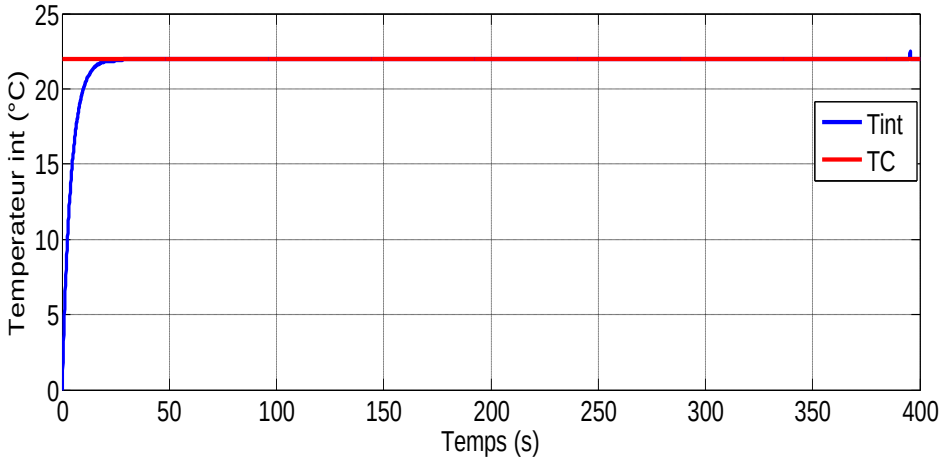
Nous allonstester notre modèle Nous allons avec l'unité de contrôle PD0F.Notre serre a un volume de 4000 m^3 et la couverture réduit l'ensoleillement de 60%, le coefficient de transfert de chaleur UA = 25 $kW.K^{-1}$, et la densité de l'air 1,2 $Kg.m^{-3}$ avec chaleur spécifique 1006 j .Kg-1.K-1.

Supposons que le capteur ait un retard dans la mesure de la température et de l'humidité de 30 sec (dT= dH=30 sec) .

III.7.1.2.Premier test sans changement des conditions extérieures

III.7.1.2.1.Contrôle du système sans changement de consigne (point de réglage)

Dans cette partie nous allons tester notre contrôleur PD0F, nous avons aussi KIT=5,KDT=20, KIH=350, KDH=2500, et nous avons aussi Text=42°C, Hext=85%, R=700$W.m^{-2}$,TC=22°C, HC=75%.



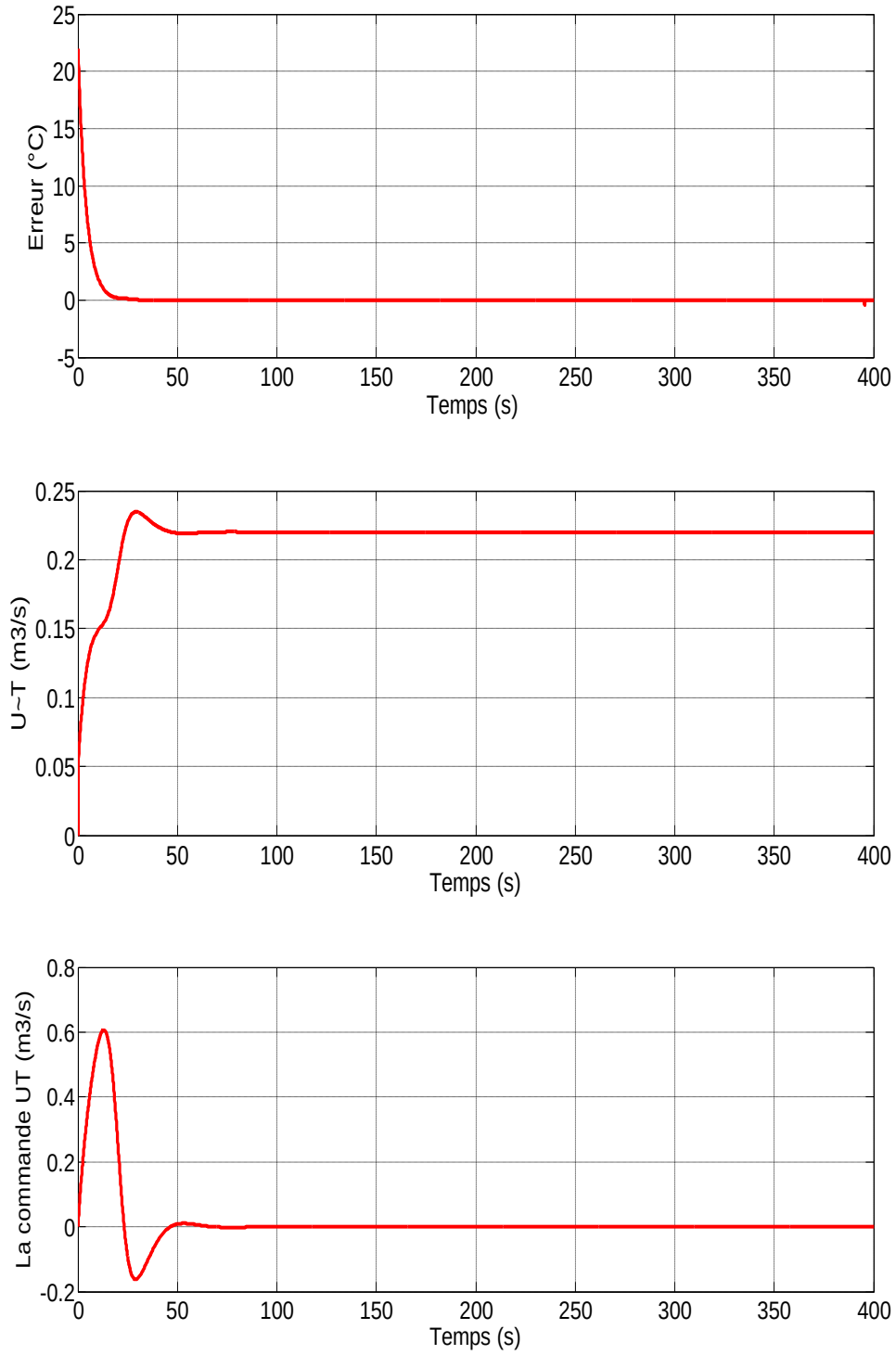
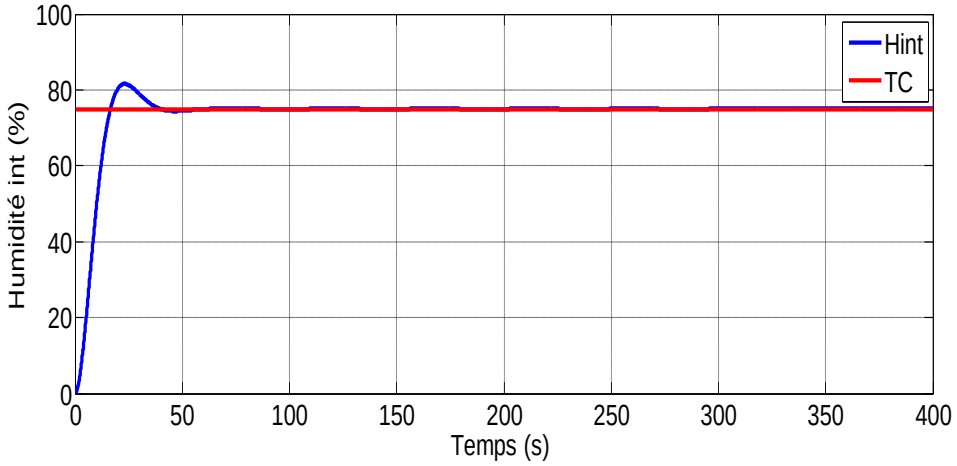
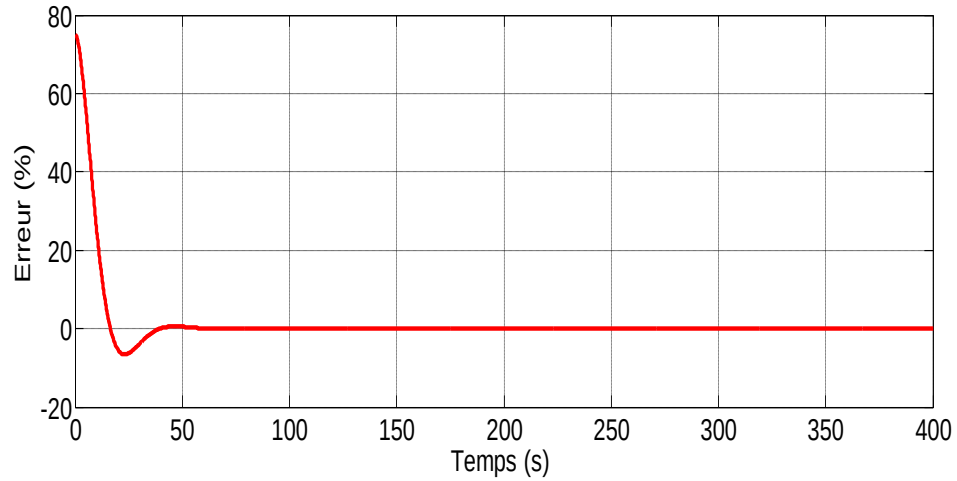
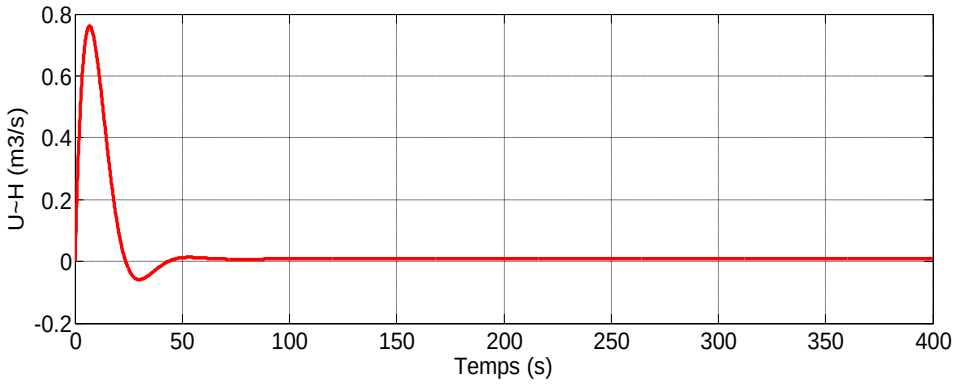


Figure III.6 : Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.


Hint
TC
Humidité int (%)
Temps (s)


Erreur (%)
Temps (s)


U~H (m3/s)
Temps (s)

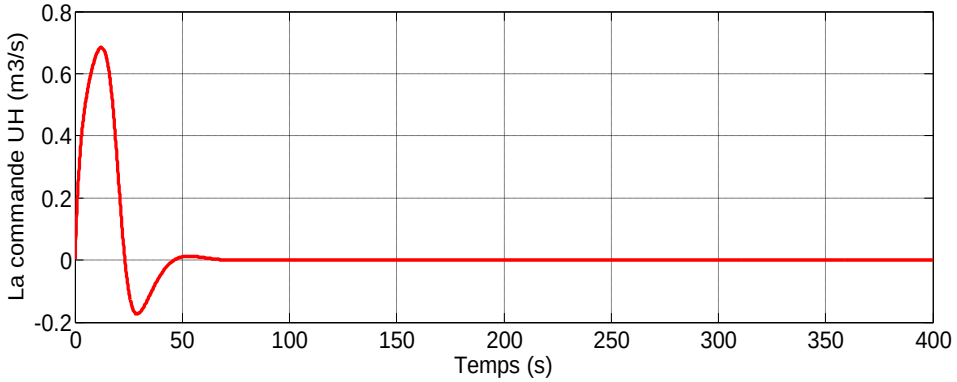
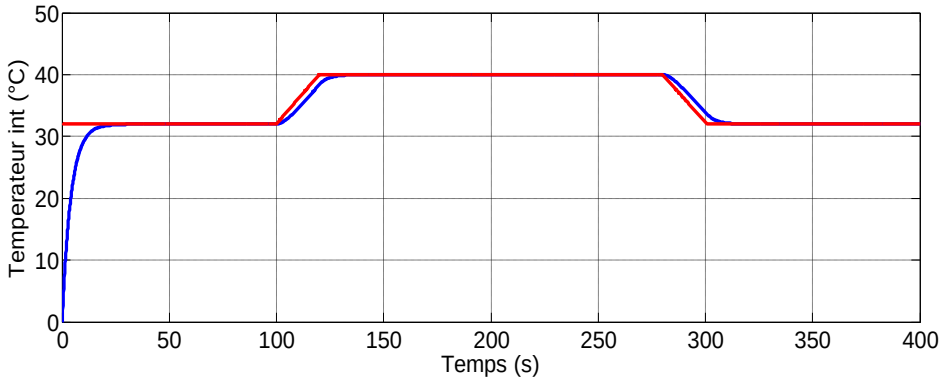


Figure III.7 : Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.

III.7.1.2.2. Contrôle avec changement de consigne

Maintenant, nous allons tester nos contrôleurs en changeant l'étape des points de réglages, le point de réglage de rapport d'humidité sera augmenté à t=200min de 45% à 65%, et pour la température diminué a t=150min de 40°C à 28°C. Avec même conditions atmosphériques extérieures.



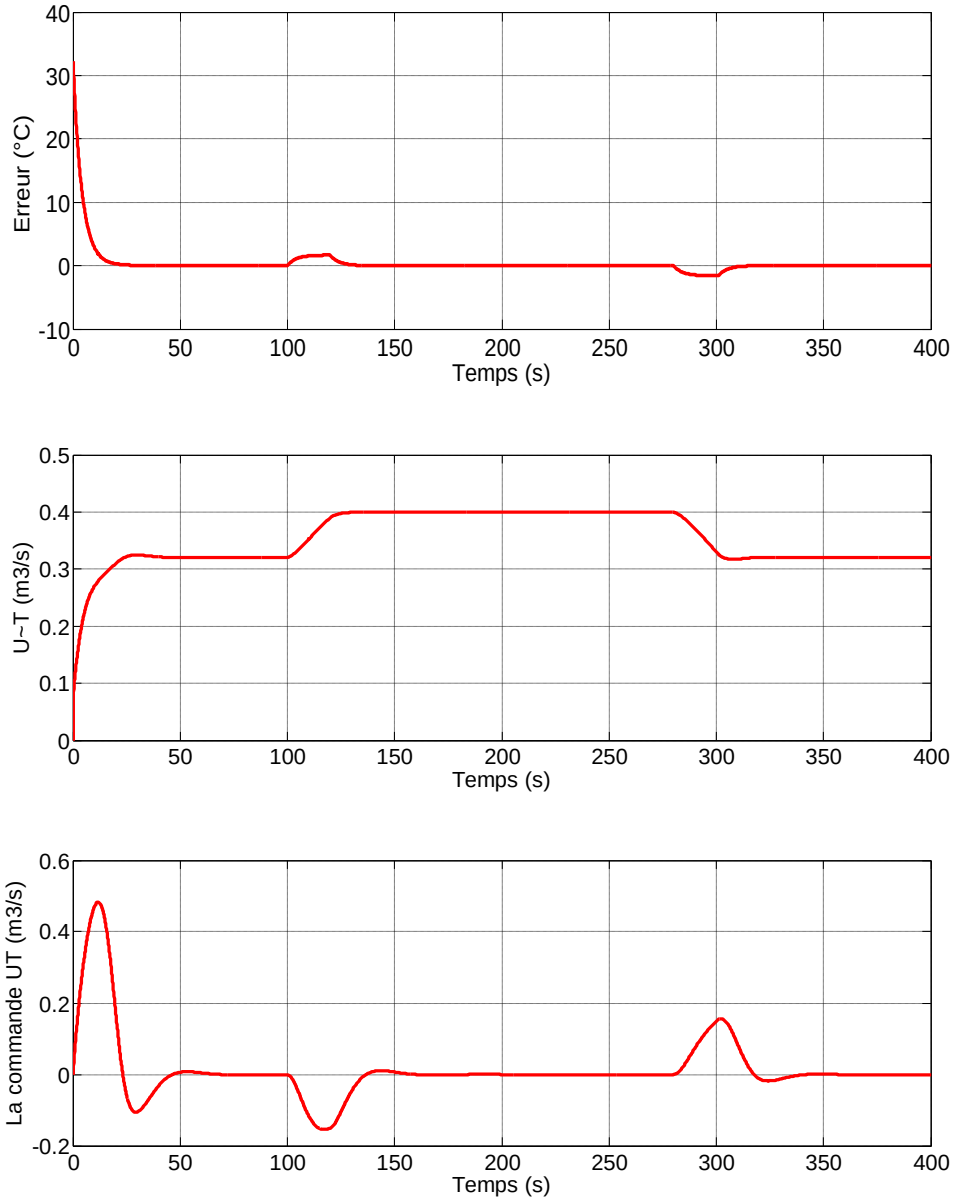


Figure III.8 : Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement d'étape de la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.

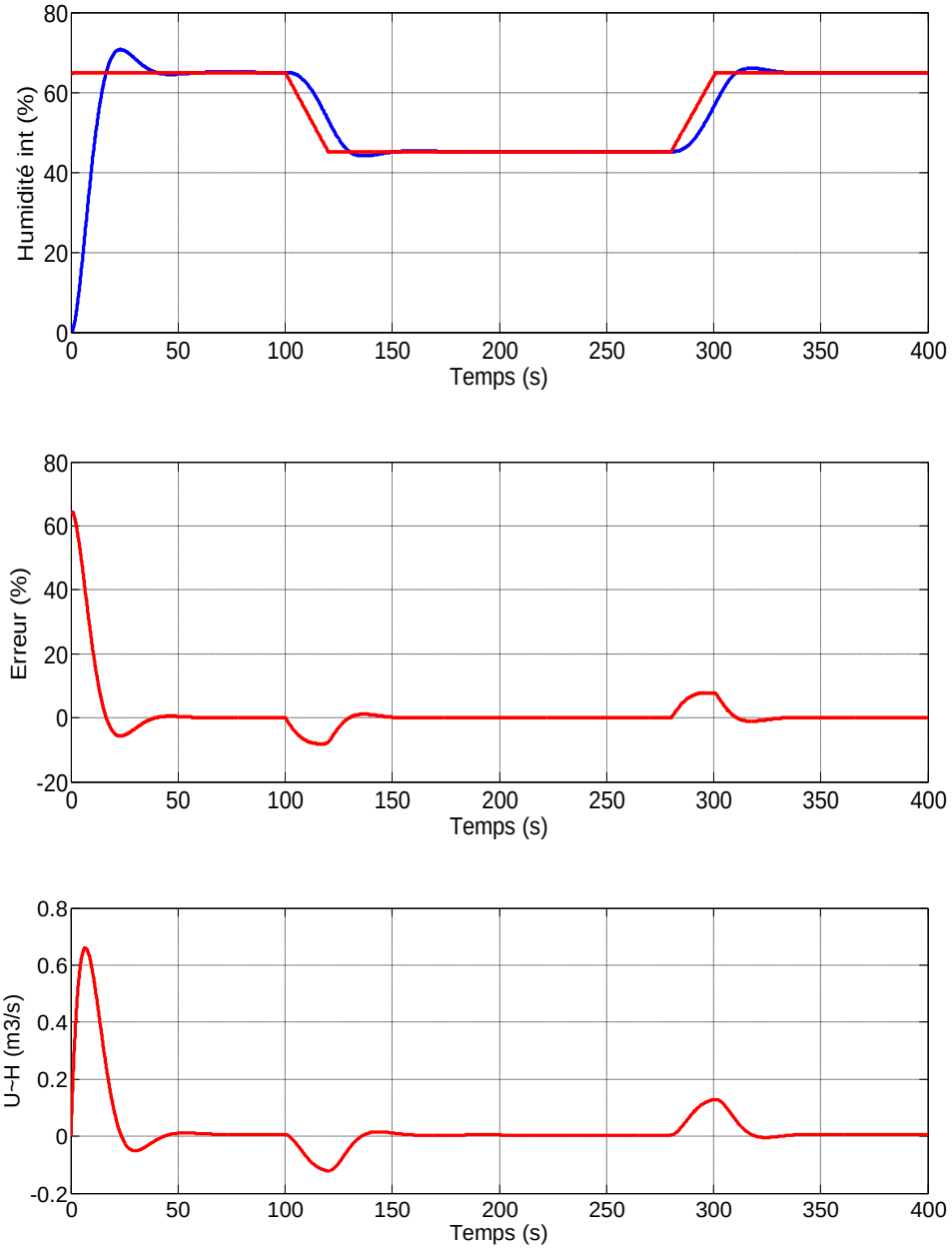


Figure III.9 : Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement d'étape de la consigne et les conditions atmosphériques extérieures fixes.

III.7.1.2.3. Contrôle avec série d'impulsions de consigne

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

La température :

Temps : [0 200 200 400 400 600 600 800 800 1000] (s)

TC : [36 36 22 22 36 36 22 22 36 36] (°C)

L'humidité :

Temps : [0 200 200 400 400 600 600 800 800 1000] (s)

HC : [65 65 80 80 65 65 80 80 65 65] %

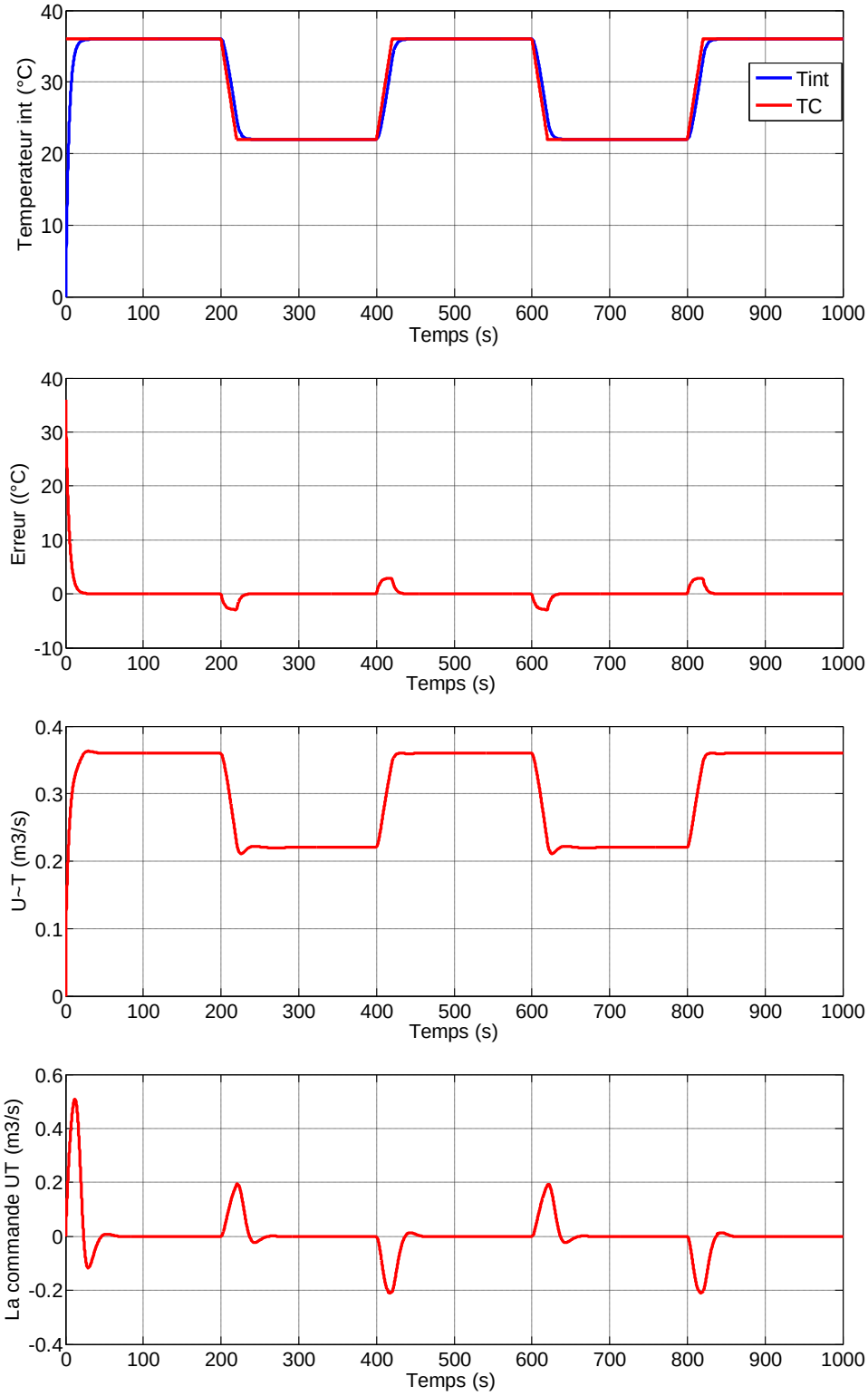


Figure III.10 : Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques fixes.

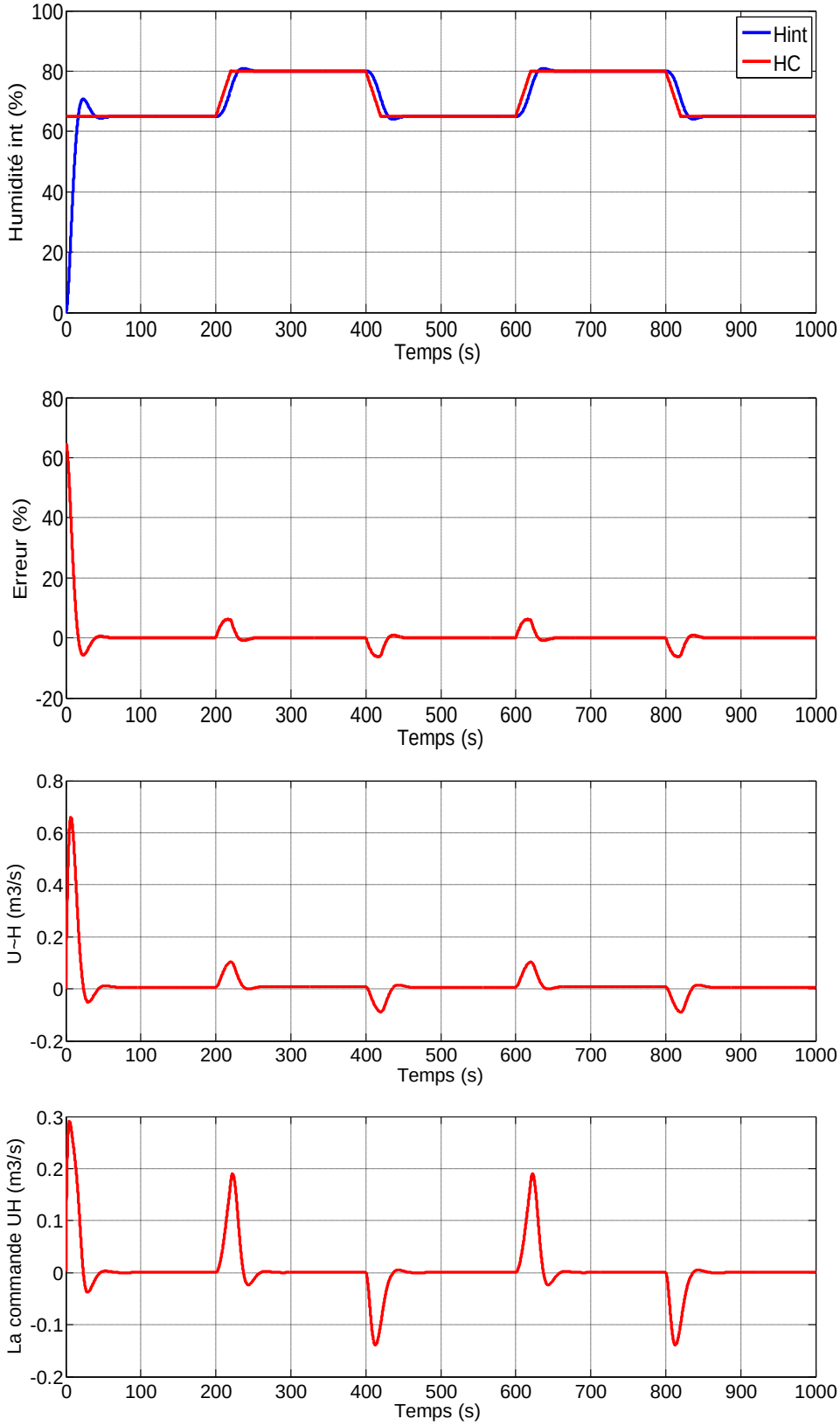


Figure III.11 : Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphérique fixes.

III.7.1.3.Deuxième teste avec changement des conditions extérieures

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

la température :

Temps : [0 200 200 400 400 600 600 800 800 1000] (s)
TC : [36 36 22 22 36 36 22 22 36 36] (°C)

L'humidité :
Temps : [0 200 200 400 400 600 600 800 800 1000] (s)
HC : [65 65 80 80 65 65 80 80 65 65] %

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

- Pour la température :

T(s)	T(°C)	T(s)	T(°C)	T(s)	T(°C)	T(s)	T(°C)
15	25	570	18.2	795	25.7	1090	37.3
30	24.8	585	18.4	810	26.9	1095	37.1
60	24.5	600	18	825	27.3	1100	37.3
75	24.3	615	19.2	840	2.8	1105	36
90	24.3	630	19.9	845	29.1	1110	35.8
105	24.1	645	19.7	850	29.9	1125	34.4
135	23.6	660	19.6	860	30	1140	32.5
165	22.8	675	19.9	870	31.5	1155	32.2
195	22.6	690	20.1	875	32.5	1170	31.5
225	22.2	705	20.3	880	44.4	1180	31.2
240	21.7	720	20.7	885	35	1185	30

270	21.4	730	20	890	35.4	1190	29
285	21.1	735	21.1	895	35.8	1200	28
300	20	750	21.4	900	35.9	1215	26
315	20.7	755	21.7	915	36	1230	25
330	20.3	760	22.2	930	36.2	1245	24
360	20.1	765	22.6	945	36.4	1260	23
390	19.9	780	22.8	960	36.2	1275	/
405	19.6	795	23.6	975	36.7	1290	/
420	19.7	810	24.1	990	36.5	1305	/
450	19.9	825	24.3	1005	36.8	1320	/
480	19.2	840	24.8	1020	36.9	1335	/
510	18	845	25	1040	37.4	1350	/
540	18.4	850	25.8	1050	37	1365	/
550	18.2	860	25.1	1065	37.4	1395	/
555	18.1	870	25.6	1080	37.8	1425	/

Tableau.III.1 : Température tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996.

- Pour l'humidité :

T (s)	H (%)	T (s)	H (%)	T (s)	H (%)	T (s)	H (%)
0	80.8	315	79.1	780	68.4	1100	38
15	81.9	330	78.9	785	66.9	1130	37.1
30	82.8	345	78.5	790	64.1	1160	36.7
45	83.7	360	78.1	800	62.7	1175	36.8

60	84.2	390	78.7	810	61.3	1180	36.4
75	85.5	420	65.2	825	59.7	1185	35
90	86.7	440	65.8	840	59.1	1190	36.3
105	89.3	460	78.5	855	58.3	1195	36.2
120	90	480	78.2	870	57.7	1200	36.1
130	89.5	510	78.8	885	56.1	1205	36.7
140	89.7	540	78.3	900	54.8	1210	36.9
150	89.8	565	78.4	915	52.3	1215	37.1
175	89.1	595	78.7	930	48.1	1220	37.6
190	88.6	630	78.8	945	47.3	1235	37.7
205	88.1	650	79.1	960	45.8	1250	38.9
225	87.5	675	79.5	975	43.2	1265	40
240	87.1	690	80	990	40.9	1280	42.3
250	85.9	705	78.6	1020	39.3	1310	44.8
260	84.1	720	76.1	1035	39.4	1325	46.8
270	82.3	730	74.9	1055	39.2	1340	50.1
280	81.8	740	72.3	1070	39.1	1355	55.1
300	79.3	760	70.7	1090	38.4	1340	59.2
1355	60.1	1370	62.1	1385	62.5	1400	64.2

Tableau.III.2: Humidité tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996.

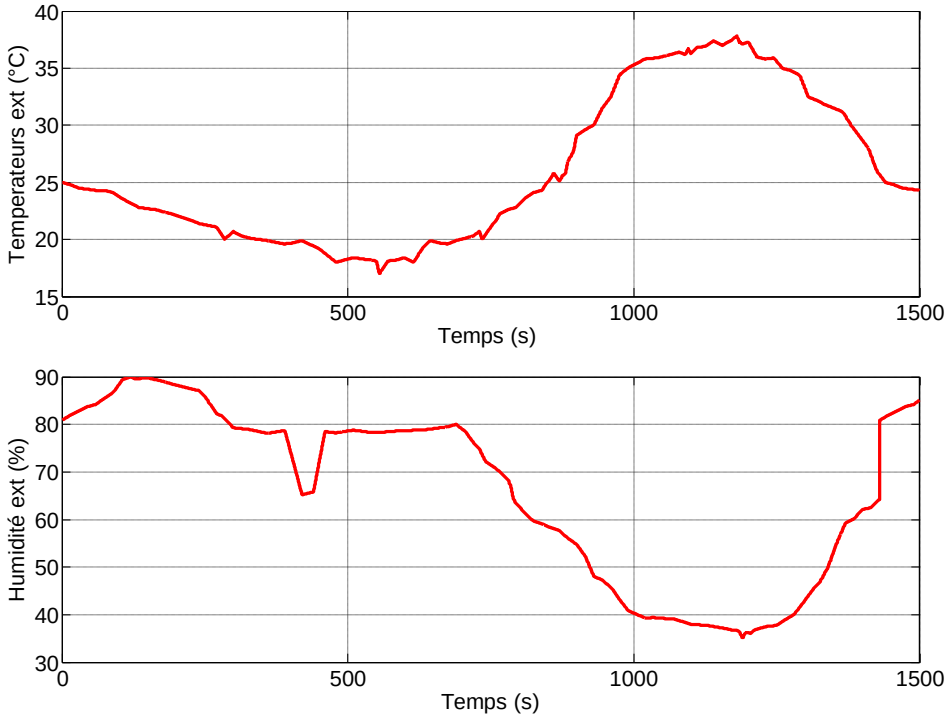
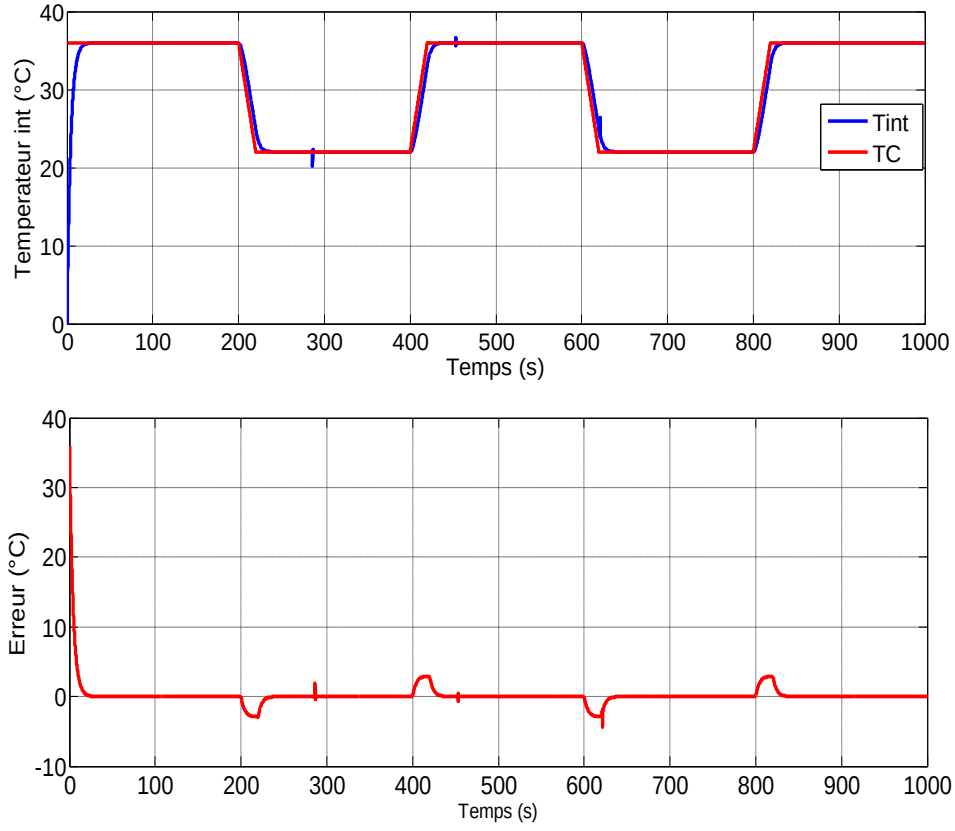


Figure III.12 : Evolution de température et humidité tunisienne au cours de deux jours 14 et 15/Février/1996.



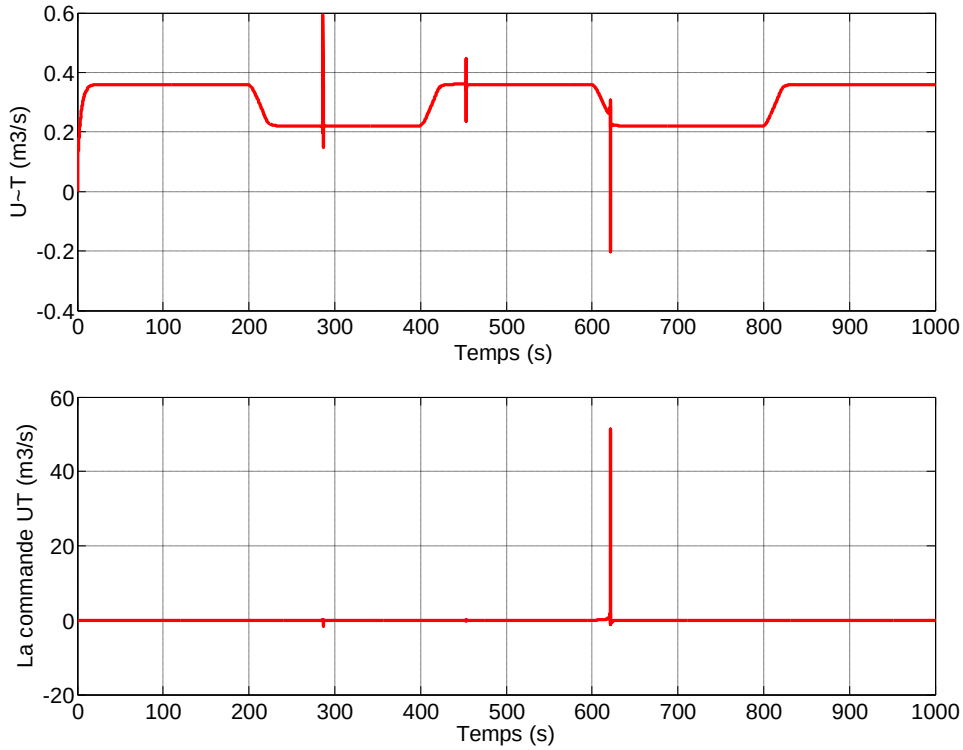
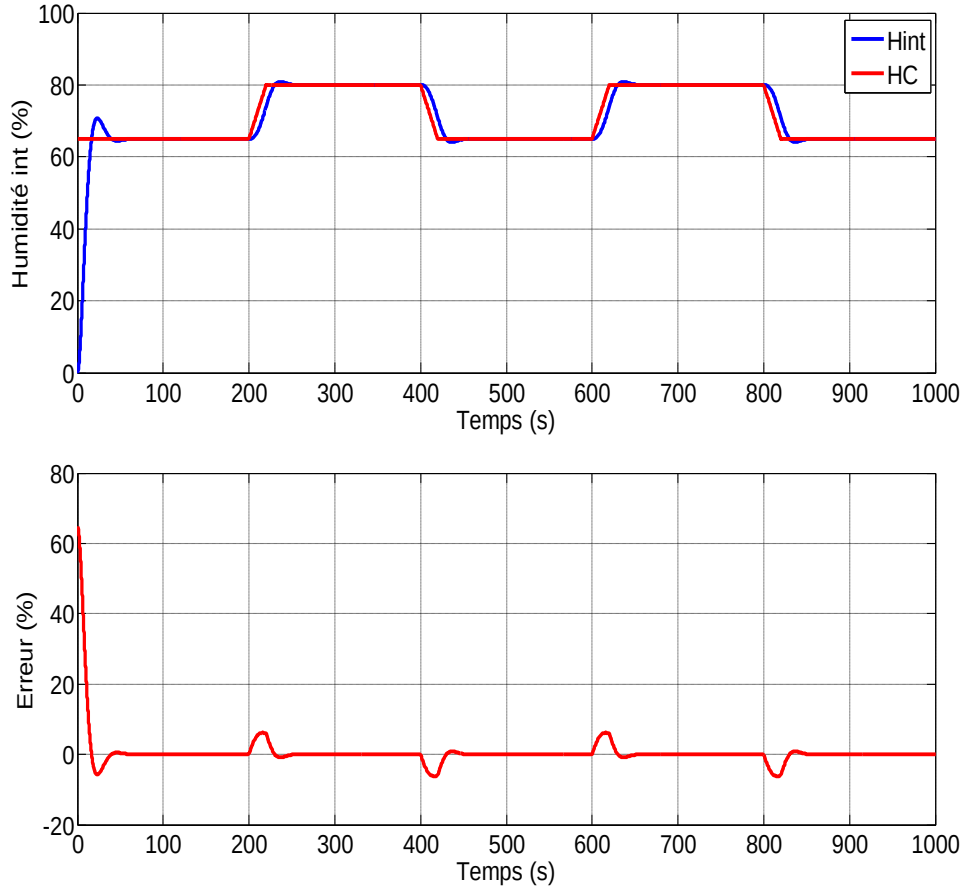


Figure III.13 : Contrôle avec commande de température intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques tunisienne.



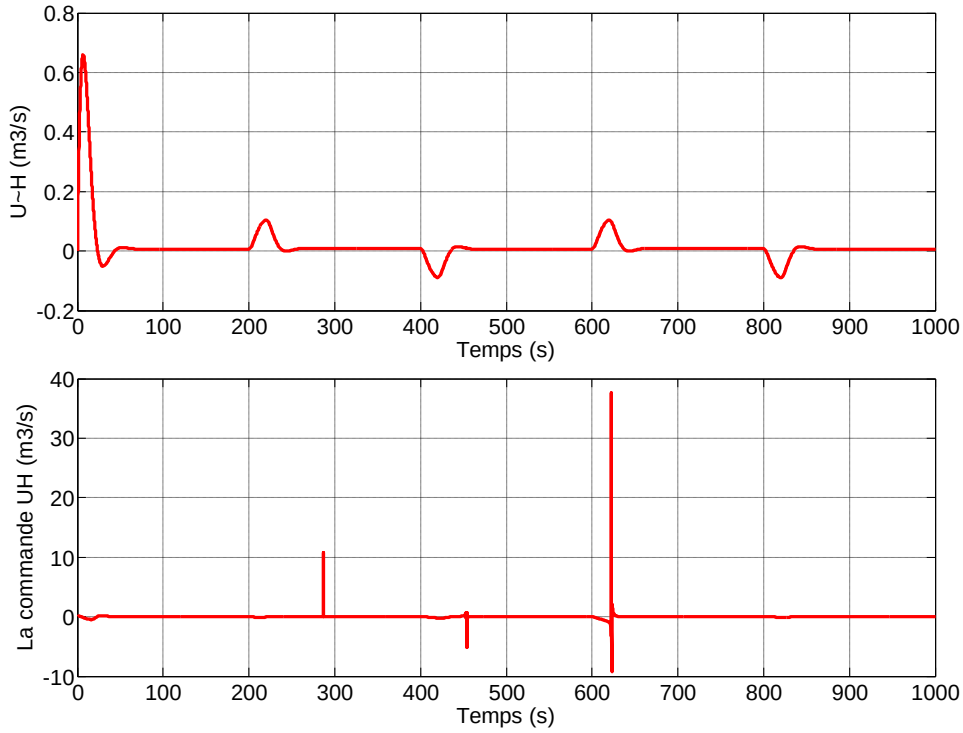


Figure III.14 : Contrôle avec commande d'humidité intérieure de la serre avec changement des étapes de consigne (série d'impulsions) et les conditions atmosphériques tunisienne.

III.8.Interprétation

La simulation dans le système PDOF pour chaque figure montre que nous obtenons des signaux lents, plus le KIT et KDH sont grands, plus la réponse du système est grande, ce qui signifie que grâce à KIT et KDH, la réponse du système devient rapide.

Le contrôle de la température et de l'humidité dans la serre a également été simulé en se rapprochant des conditions extérieures réelles, ce qui nous a donné des résultats acceptables et vérifiables.

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 : Text=32°C, Hext=82% et R=700Lux.

Pour chaque forme, nous notons que les sorties (Tint, Hint) vont bien selon les instructions requises avec erreur en état constant, mais le temps de réponse pour notre système PDOF est grand.

Temps de réponse thermique interne : 24,1 min.

Le temps de réponse d'humidité interne : 23,2 min.

III.9.Conclusion

Le climat à l'intérieur d'une serre agricole est un système dynamique très complexe, la température et l'humidité à l'intérieur sont non linéaires et fortement couplées par les lois de la thermodynamique, par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de contrôle précises et fortes.

Dans ce chapitre nous allons entamer en premier lieu l'étude de quelques notions sur le système automatisé et des commandes automatiques utilisées dans ce domaine (PDOF).

Dans notre modèle, nous remarquons que le temps de réponse est long, donc dans le prochain chapitre, nous utiliserons le contrôleur flou.

CHAPITRE IV :

Régulation de la température et de l'humidité par contrôleur flou

IV.1. Introduction

Le climat à l'intérieur d'une serre agricole est un système dynamique très complexe, la température et l'humidité à l'intérieur sont non linéaires et fortement couplées par les lois de la thermodynamique.

La logique floue est une branche des mathématiques et, à ce titre, toute une série de notions fondamentales sont développées. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit, on ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe du réglage par la logique floue, Ces éléments sont :

- les variables floues

- les règles d'inférences.

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.

IV.2.LES SOUS-ENSEMBLES FLOUS [35]

Une des notions fondamentales dans les mathématiques est la notion d'ensemble. La théorie des ensembles a été crée par le mathématicien allemand Georg Cantor.

Il a défini les ensembles comme de la collection d'objets. Un ensemble peut être défini, discret ou continu. Nous pouvons le décrire de trois manières différentes :

1. En donnant une liste de ses éléments.

Par exemple : E = {a, b, c, d, e} est un ensemble fini, qui contient cinq éléments. Ces

éléments appartiennent à cet ensemble et cela peut être noté :

$a \in E, b \in E, \ldots e \in E$. la relation inverse est notée : $x \notin E$.

2. En donnant une propriété pour l'appartenance. Si P(x) est un prédicat qui énonce que l'élément $x \in a$ la propriété P(x), alors l'ensemble de tous les x avec cette propriété est noté comme : E={x / P(x)}.

3. En définissant la fonction caractéristique pour tous les éléments x de l'univers du discours U. L'univers du discours est l'ensemble référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le cotexte donné. La fonction caractéristique de l'ensemble E, μE :

{0,1} est défini comme :

$$1 \quad si \quad x \in E$$

$$0 \quad si \quad x \notin E$$

IV.3.Opérateurs de la logique floue [35]

Supposant deux fonctions d'appartenance u (x) A et u (x) B de deux variables floues x et y caractérisant la température de l'air et la force du vent, l'exemple "l'air est froid et le vent et fort" ou encore "si l'air est froid ou le vent n'est pas faible" il faut fermer la porte. Les compositions ET et OU en plus de la négation apparaissent et doivent être définies. Pour pouvoir décider de fermer la porte ou non il faut que deux conditions soient vérifiées en même temps. Alors, il est important de pouvoir composer entre les divers prédicats et leurs fonctions d'appartenance.

Les opérateurs habituels, soit l'addition, la soustraction, la division et la multiplication de deux ou plusieurs ensembles flous existent aussi. Toutefois, ce sont les deux opérateurs d'union et d'intersection qu'on utilise le plus souvent dans la commande par la logique floue.

• Opérateur ''NON''

Selon la théorie des ensembles, l'ensemble complémentaire :

$$C = \bar{A} = NON(A)$$

Est défini par les éléments de x qui n'appartiennent pas à l'ensemble A. Dans le cas de la logique floue, cette définition peut être exprimée par les fonctions d'appartenances de la manière suivante :

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_A(x)$$

La figure (IV.1) met en évidence cette relation

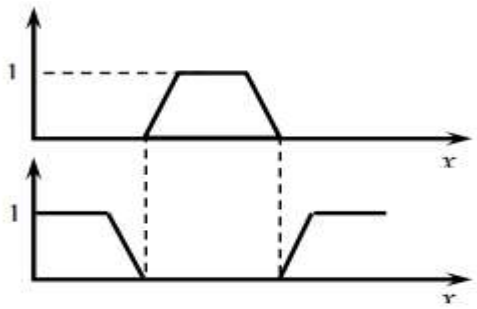


Figure IV.1 : Opérateur NON

• Opérateur « ET »

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

$$\mathrm{C} = \mathrm{A} \cap \mathrm{B} = \mathrm{A}\ \mathrm{ET}\ \mathrm{B}$$

Dans la logique floue, l'opérateur « ET » est réalisé dans la plupart des cas par la formulation du minimum, appliqué aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$et $\mu_B(x)$ des deux ensembles A et B , à savoir :

$$\mu_c(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

On parle alors de l'opérateur minimum, cette opération est représentée dans la figure 4.2

• Opérateur « OU »

L'opérateur «OU» correspond à l'union de deux ensembles A et B , on a donc :

$$\mathrm{C} = \mathrm{A} \cup \mathrm{B} = \mathrm{A}\ \mathrm{OU}\ \mathrm{B}$$

La réalisation de l'opérateur 'ou' au niveau de la logique floue se fait en général par la formulation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des deux ensembles A et B . On a donc l'opérateur maximum :

$$\mu_c(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

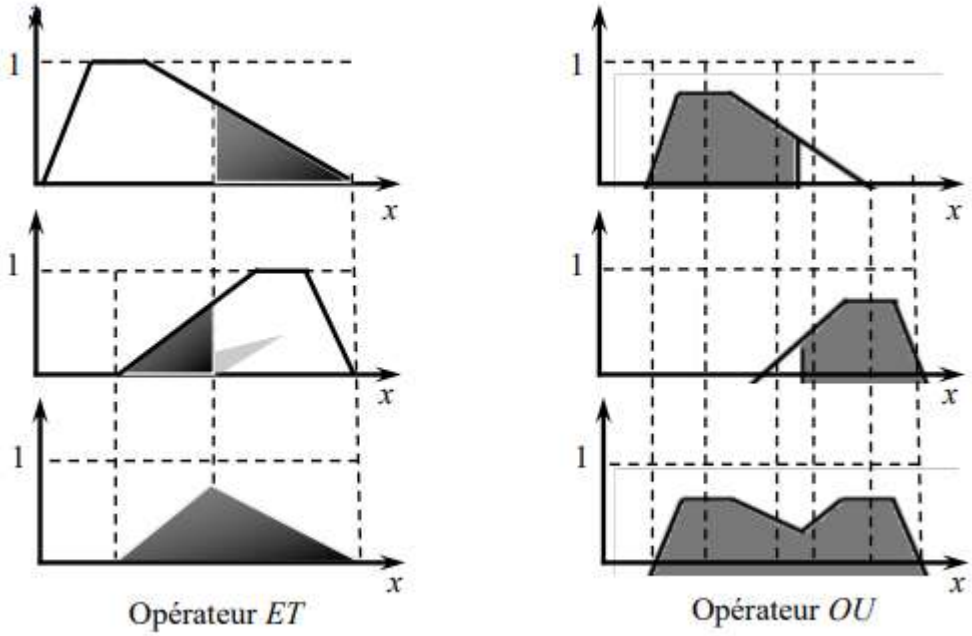


Figure IV.2 : Opérateur ET etOU

IV.4.Raisonnement floue :

Le mode naturel est trop complexe. Ces mesures sont soumises à des imprécisions, vagues et éventuellement incertaines. Le raisonnement de ces connaissances en logique classique ne suffit pas, on fait appel à un raisonnement flou.

IV.5. Structure générale d'un system flou : [35]

Chaque système basé sur la logique floue est composé de quatre blocs principaux (Figure 4.3)

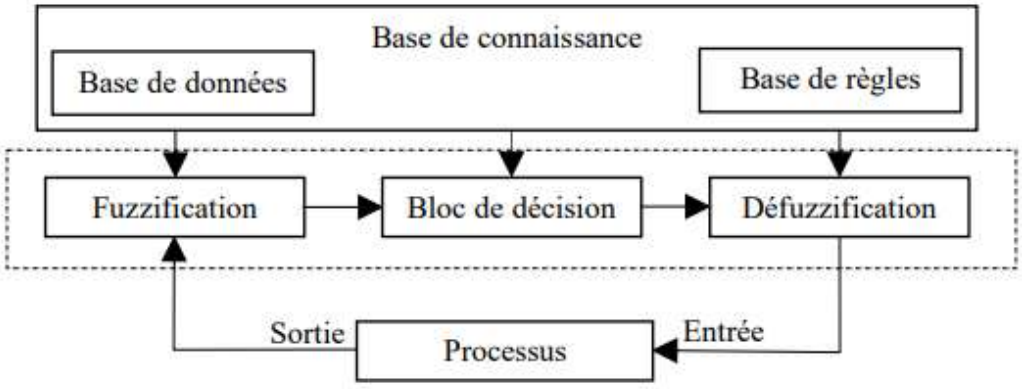


Figure IV.3 : Structure générale d'un système basé sur la logique floue.

› Base de connaissance : règles et paramètres des fonctions d'appartenance.

› Bloc de décision ou le moteur d'inférence : inférence des opérations sur les règles.

› Fuzzification : transformation des entrées précises en degrés d'appartenance.

› Défuzzification : transformation des résultats flous en sorties précises.

IV.6.Avantages et inconvénients des régulateurs flous : [35]

IV.6.1.Les avantages:

› Les régulations à variables multiples peuvent être effectuées rapidement, compréhensible et orientées vers les problèmes. Cela s'applique surtout lorsqu'il n'existe aucun modèle de système réglé ou lorsque le modèle de système réglé présente une structure non linéaire défavorable.

› Le comportement d'un système est décrit en termes linguistiques et, dès lors, il est plus simple qu'une description mathématique.

› La base de règles et la définition de l'ensemble flou peuvent être étendues ou adaptées ultérieurement.

IV.6.2.Les inconvénients:

› L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile).

› L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).

› La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonction non-linéaire.

› La cohérence des inférences non garantie a priori.

IV.7. Principe d'un contrôleur flou [36]

La commande par logique floue peut s'appliquer à tout domaine de la commande traditionnelle. De plus, elle peut opérer lorsque les procédés à commander sont mal connus ou difficiles à décrire précisément, ou lorsque les variables sont évaluées subjectivement et exprimées en langage naturel et non numériquement. Elle est simple à réaliser, flexible et donc facilement adaptable aux conditions de fonctionnement du processus. Les règles sont faciles à comprendre et à modifier puisqu'elles sont exprimées par des termes du langage naturel. L'architecture interne d'un contrôleur flou est représentée par la figure IV.4.

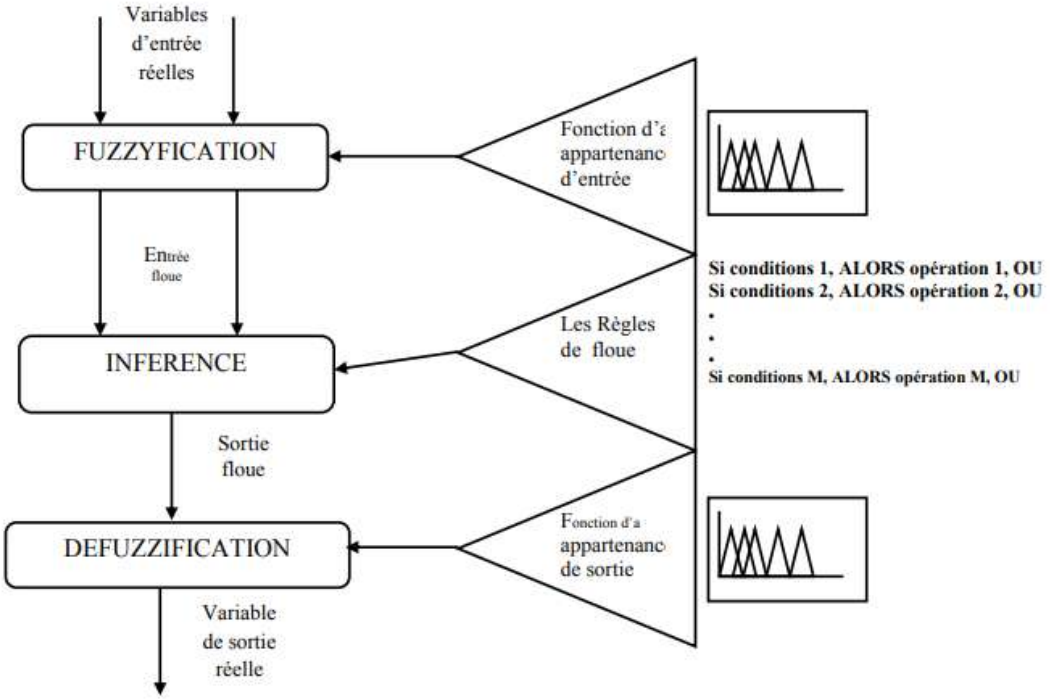


Figure IV.4: Les opérations du contrôleur floue.

Un contrôleur flou est composé de trois blocs : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification .

› **La fuzzification** : transformation des variables en variables floues (aussi appelées variables linguistiques) en leur associant des lois de véracité (la variable taille est divisée en modalités « un individu de taille 162 cm est « petit » à 60%, « moyen » à 40% et « grand » à 0% »). Ce procédé s'apparente à la définition de lois a priori en statistiques bayésiennes, avec dans cette exemple une loi a priori (0,6 ; 0,4 ; 0). La différence dans ce cadre est que la somme des véracités n'est pas tenue de valoir 1.

› **L'inférence floue :** construction de règles (et de résultats) basées sur les variables linguistiques, attribution d'une véracité à chaque règle, puis agrégation des règles pour obtenir un résultat (linguistique) unique

› **La defuzzification :** passage d'un résultat linguistique à un résultat chiffré.

IV.8.Contrôle de notre système [34]

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

IV.8.1.Réglage grossier

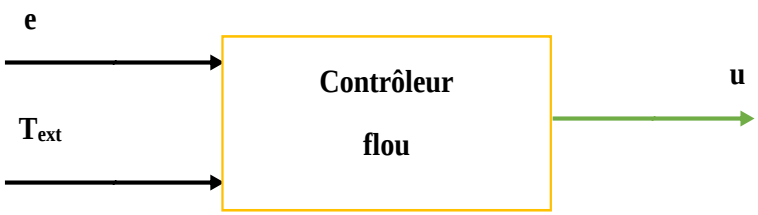
IV.8.1.1.Régulation de température

› Définition des variables de commande

Dans ce type, nous nous intéressons à la modification et à la régulation de la température à l'intérieur de la serre, nous allons donc considérer les variables suivantes :

• e: l'erreur qui représente la différence entre la consigne et la sortie réelle.

• Tex : la température extérieure.



• U : la sortie qui représente la sortie réelle.

Figure IV.5: Contrôleur flou du système de refroidissement pour un réglage grossier.

• Définition des variables linguistique

Nous avons trois sous-ensembles flous :

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

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

› T (Tex)= {F, T, C} : Les sous-ensembles flous associés à la température extérieure sont :

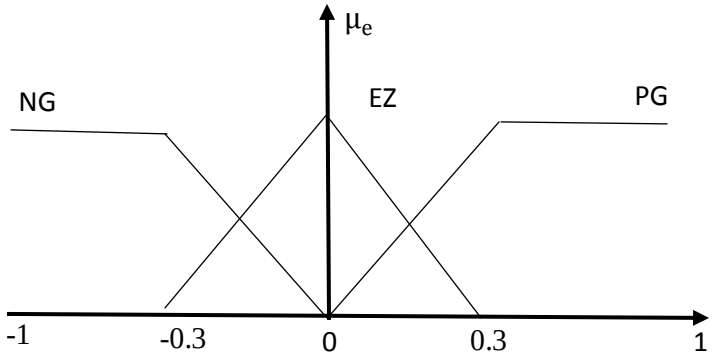
F : Froid, T : Tiède, C : Chaud.

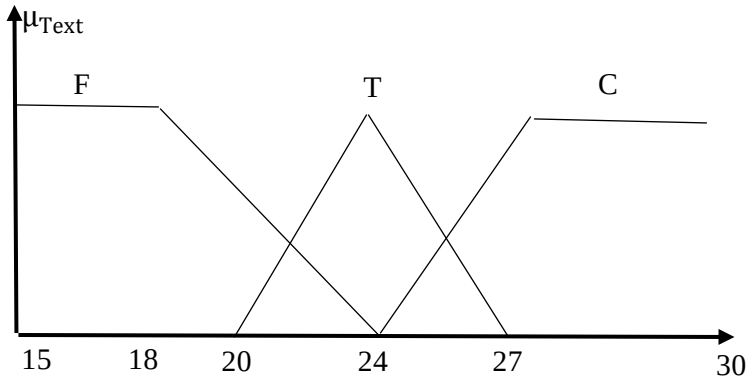
› T (u)= {PC, AC, AL} Les sous-ensembles flous associés à la loi de commande sont :

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 25°C pour la température sous serre.





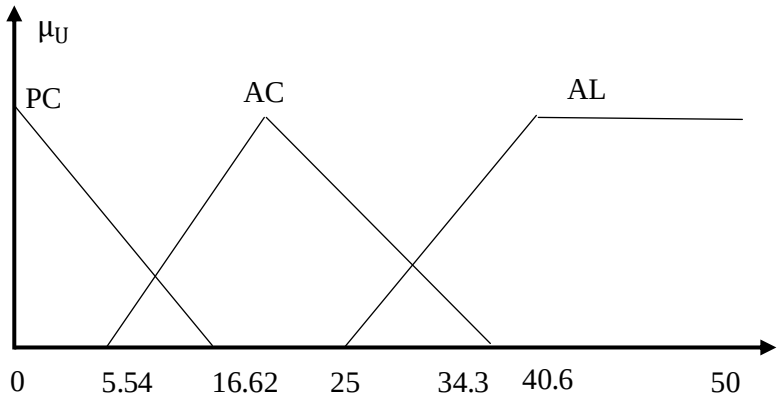


Figure IV.6 : Fonctions d'appartenances pour un réglage grossier de la température.

• Règles de contrôle

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

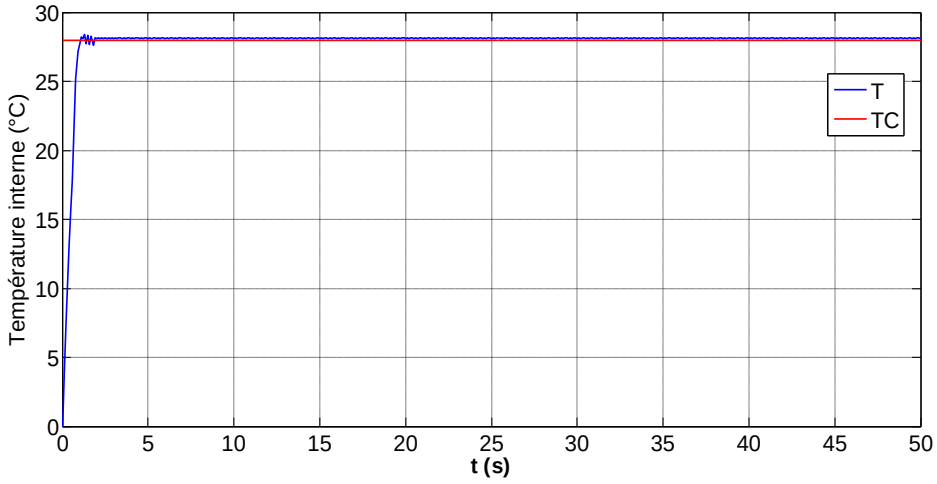
e \ T_{ext}	F	T	C
NG	PC	PC	AC

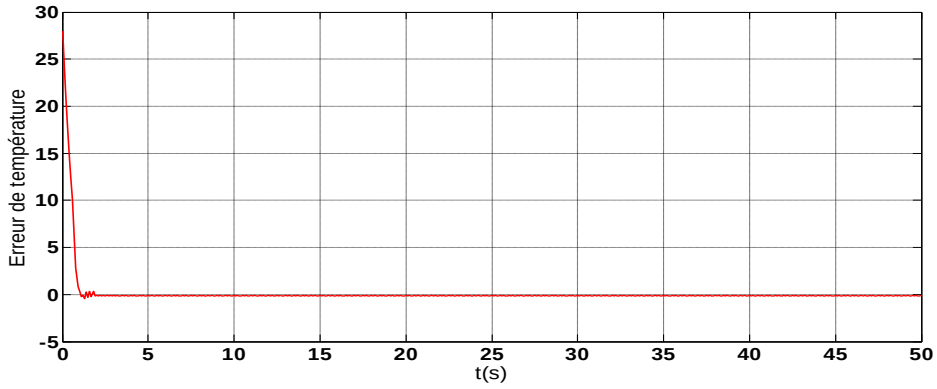
EZ	PC	PC	PC
PG	PC	AC	AL

Tableau IV.1 : Table de décision pour un réglage grossier de la température

• Résultats de simulation :

•Régulation de température sans changement de consigne T= 28°





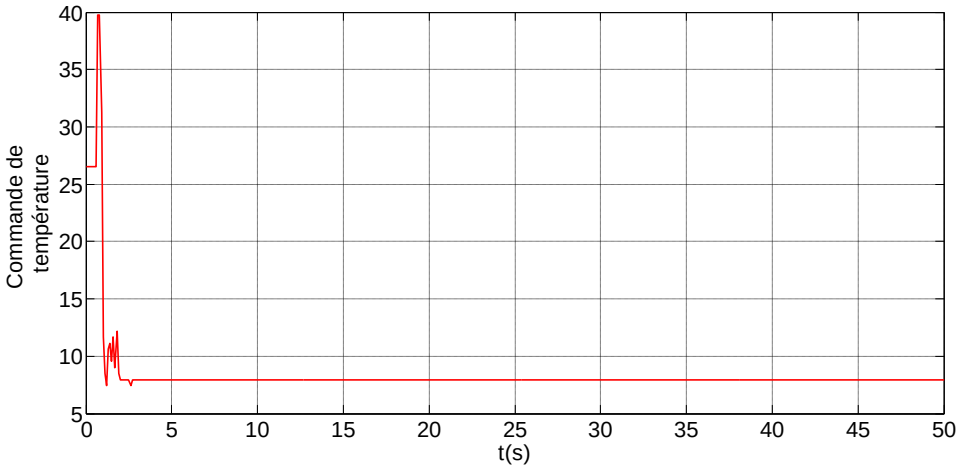


Figure IV.7: Réglage grossier de température sans changement de consigne.

•Réglage de température avec changement de consign

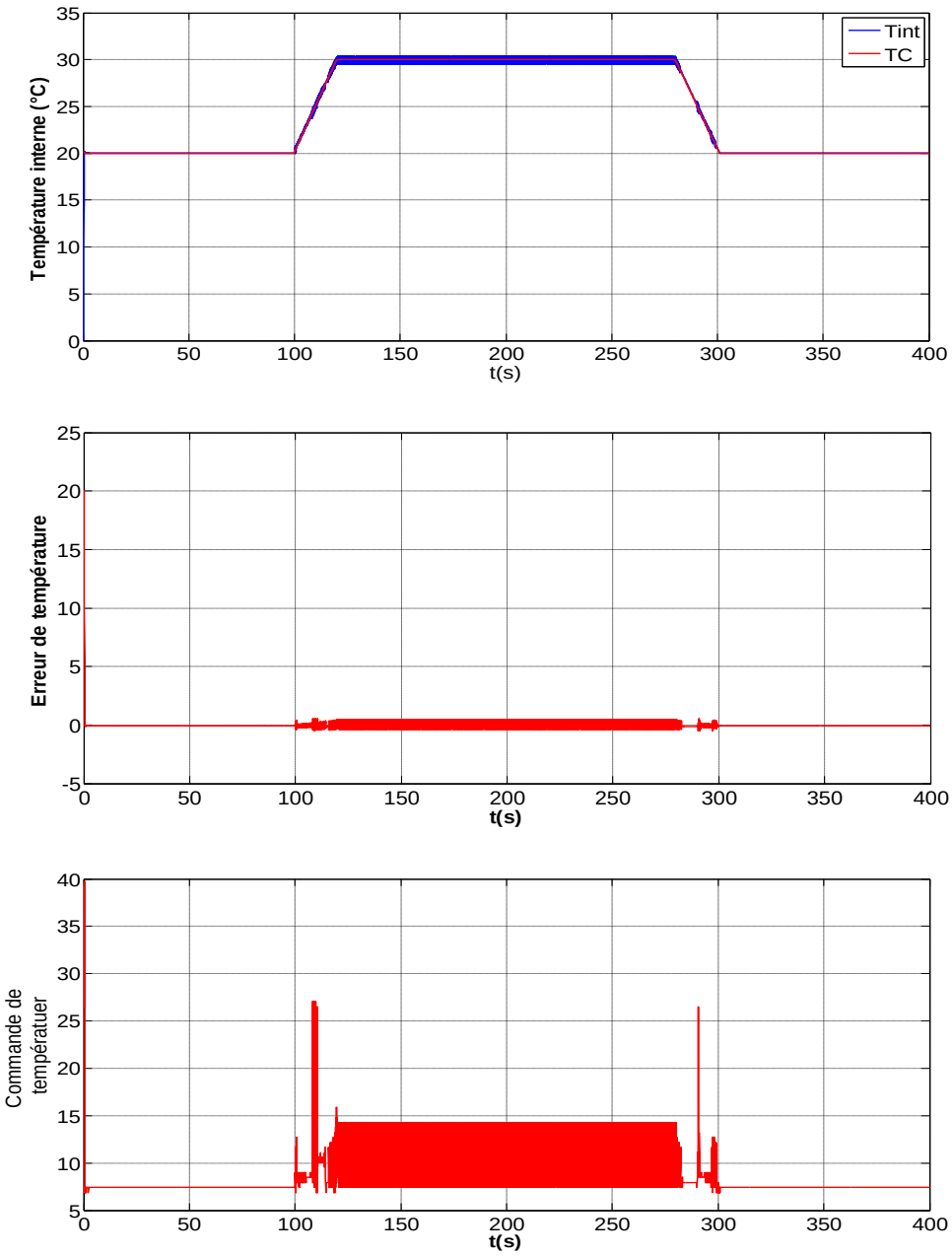


Figure IV.8 : Réglage grossier de température avec changement de consigne.

IV.8.1.2.Régulation de l'humidité

• Définition des variables de commande

Nous surveillerons le changement d'humidité à l'intérieur de la serre en regardant les commandes de variables suivantes :

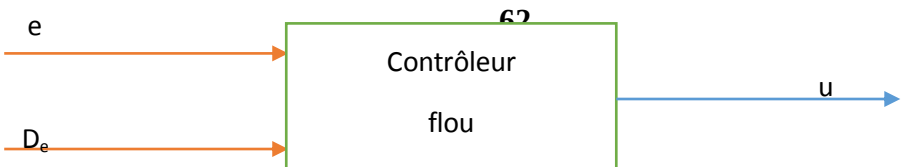


Figure IV.9 : Contrôleur flou du système d'humidification pour un réglage grossier de l'humidité.

› 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

Nous avons les sous-ensembles flous suivants :

› X : est l'univers de discours. Dans notre, cas on divise l'univers de discours de chaque variable en trois sous-ensembles flous.

› μ(e) = {NG, EZ, PG} Sous ensemble flou associé à l'erreur sont :

NG : Négatif grand noté, EZ : Environ de zéro noté, PG : Positif grand noté.

› μ (D_e) = {NG, EZ, PG} Sous ensemble flou associé à l'erreur sont

NG : négatif grand noté, EZ : environ de zéro noté, PG : positif grand noté.

› μ (u) = {PC, AC, AL}. Sous ensemble flou associé à la loi de commande sont :

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

• Définition des fonctions d'appartenances

Dans notre conception le choix des fonctions d'appartenances est basé sur le fait que la consigne est égale 75% pour l'humidité sous serre.

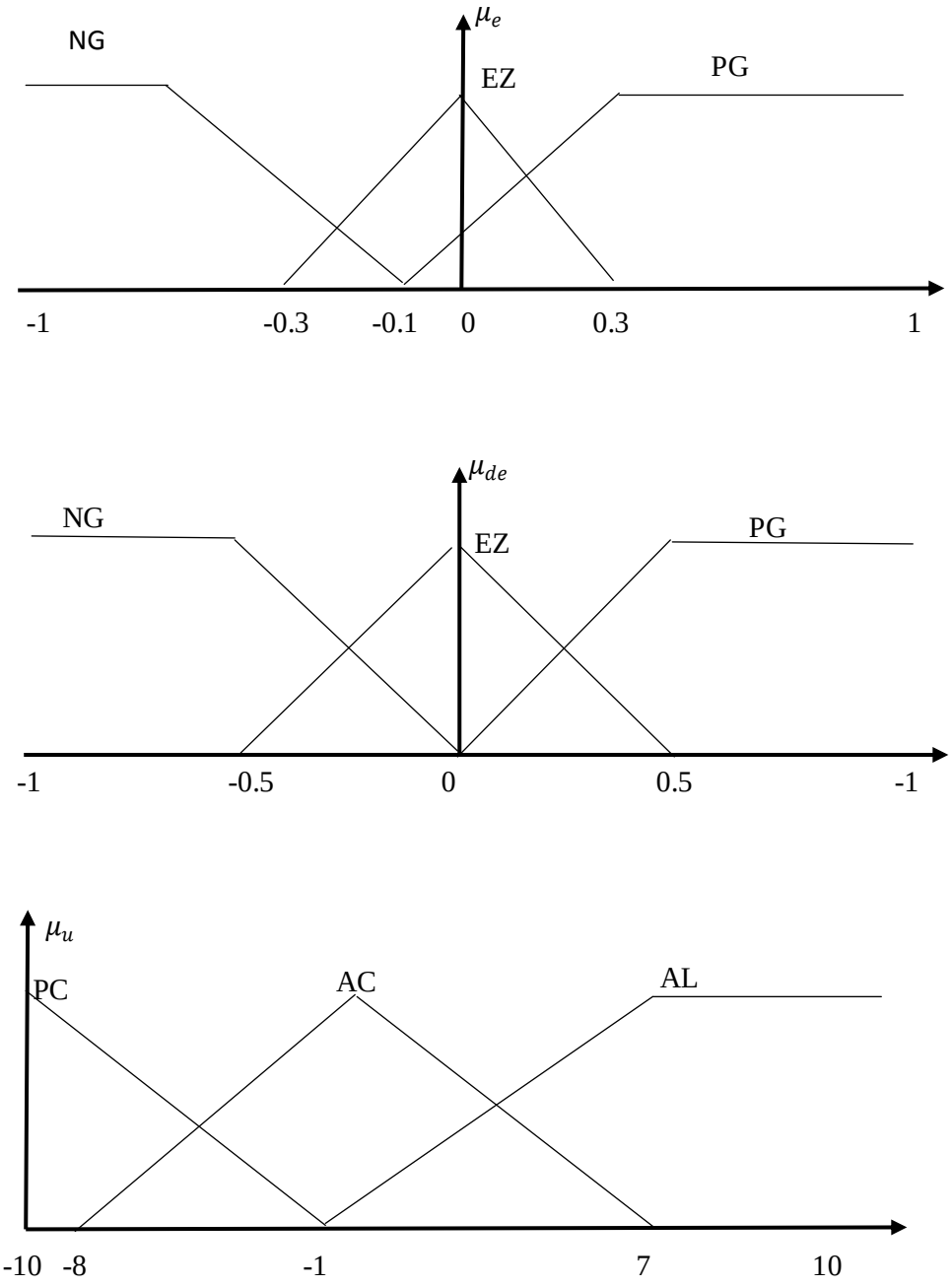


Figure.IV.10 : Fonctions d'appartenances des sous-ensembles flous de chaque variable linguistique (e, De, u) de contrôle d'humidité.

• Règle de contrôle flou

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

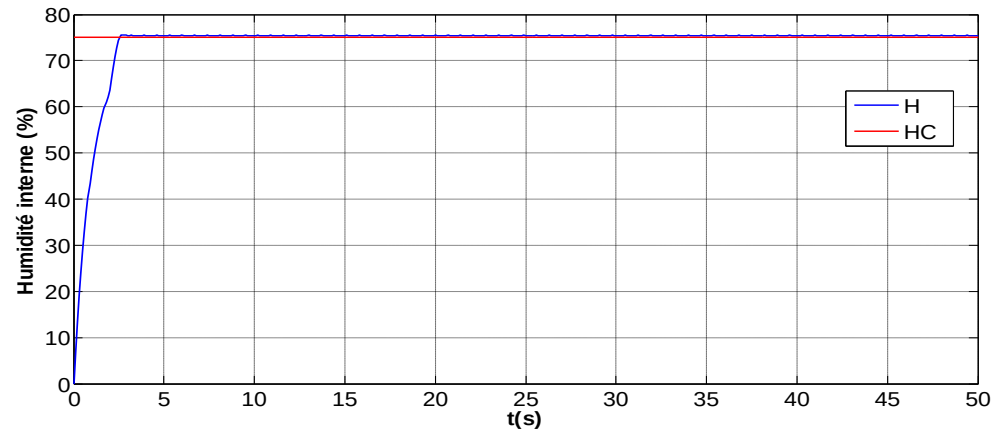
e \ D_e	NG	EZ	PG

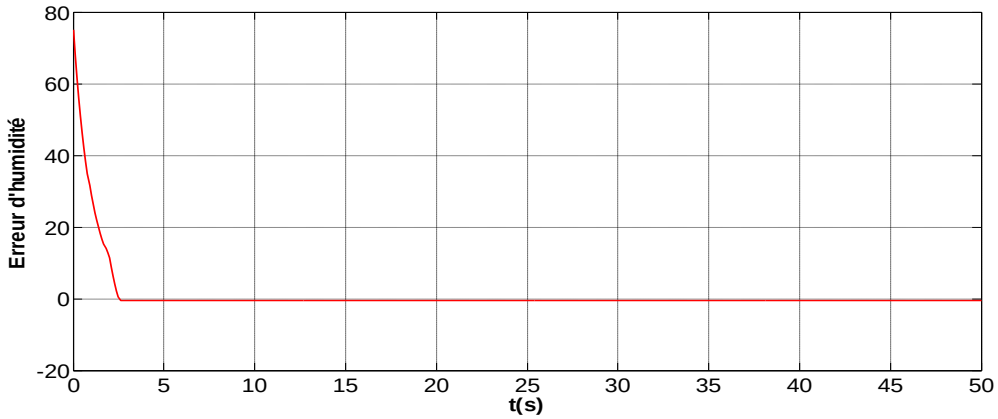
NG	PC	AC	AL
EZ	PC	AL	AC
PG	AL	AL	AL

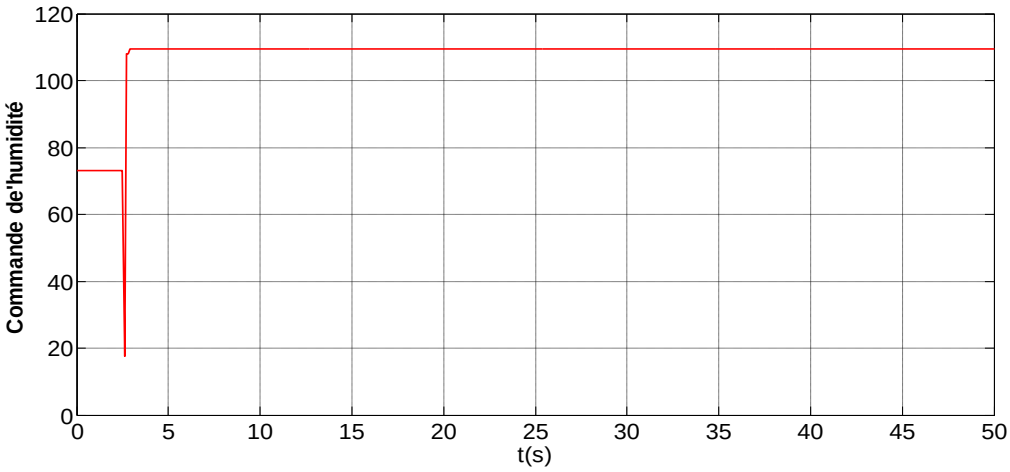
Tableau IV.2: Matrice d'appartenance pour un réglage grossier d'humidité.

• Résultats de simulation

› Régulation sans changement de consigne H=75%

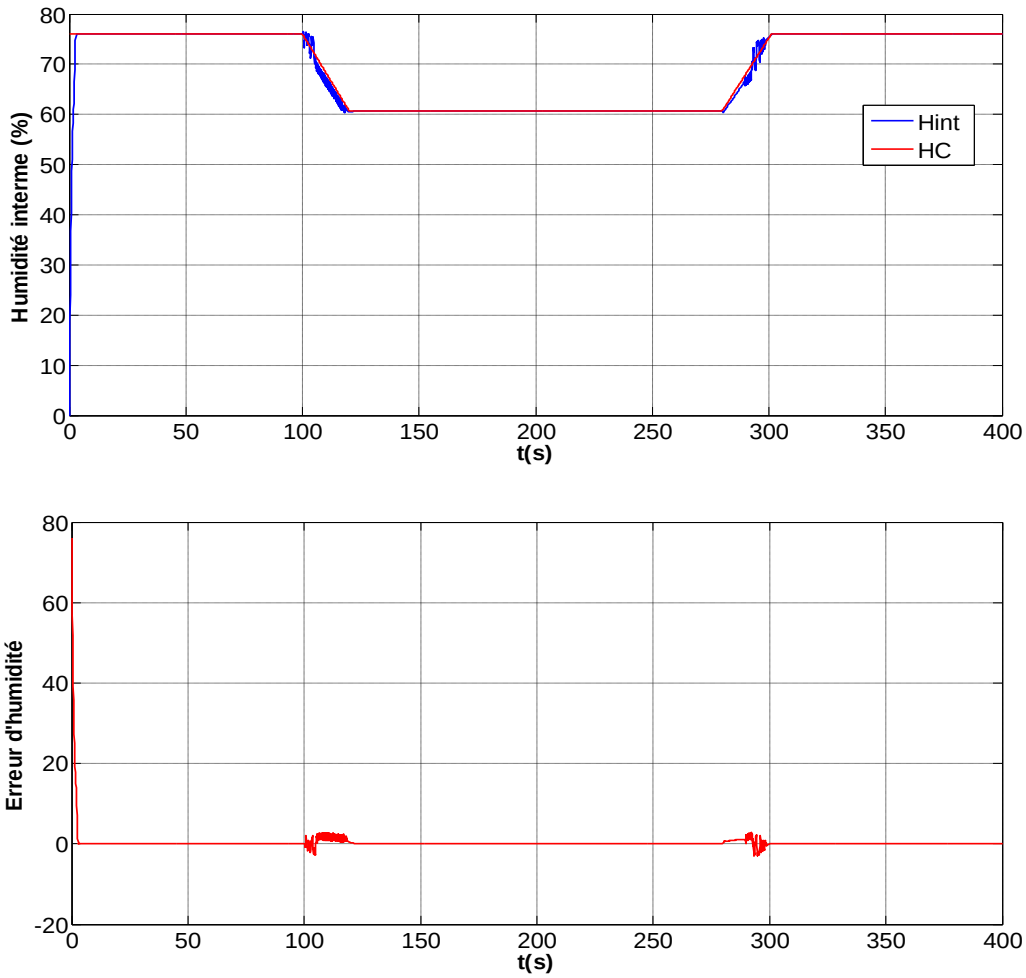


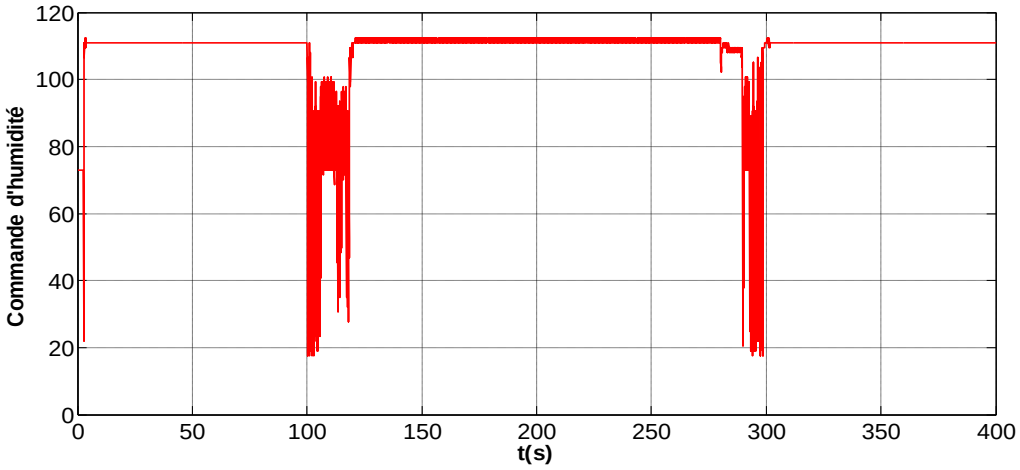




FigureIV.11 : Réglage grossier d'humidité sans changement de consigne.

›Régulation avec changement de consigne





FigureIV.12 : Réglage grossier d'humidité avec changement de consigne.

IV.8.2. Réglage fin :

IV.8.2.1. Régulation de température

Nous avons 3 variables de commande pour réglage de température dans la serre :

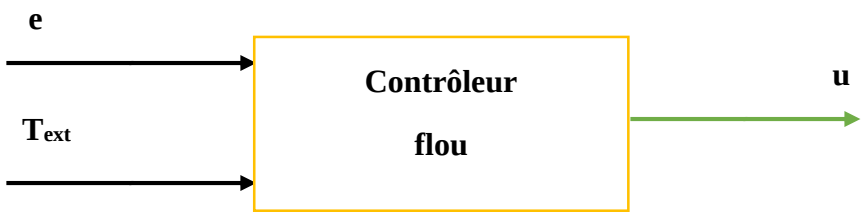


Figure 4.13 : Contrôleur flou du système de refroidissement pour un réglage fin.

• e: l'erreur qui représente la différence entre la consigne et la sortie réelle.

• Tex : la température extérieure.

• U : la sortie qui représente la sortie réelle.

• Définition des variables linguistiques

Nous avons les sous-ensembles suivants :

› T(e)= {GN, NP, EZ, PP, GP} sous-ensemble de l'erreur

Avec :

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} sous-ensemble de température extérieur

Avec :

TF : Très froid. / F : Froid. / PF : Peu froid. / T : Tiède. / PC : Peu chaud. / C : chaud.

/ TC : Très chaud.

› T (u)= {PC, AC, AL} sous-ensemble de la loi de commande

Avec :

PC : Pas de commande. / AC : Action courte. / AL : Action longue.

• Univers de discours

3 univers de discours aux 3 variable de commande :

Ud_e: [-5, 5]. ($_0$C) / Ud_{Tex}: [-5, 43]. ($_0$C) / Ud_u : [0, 43]

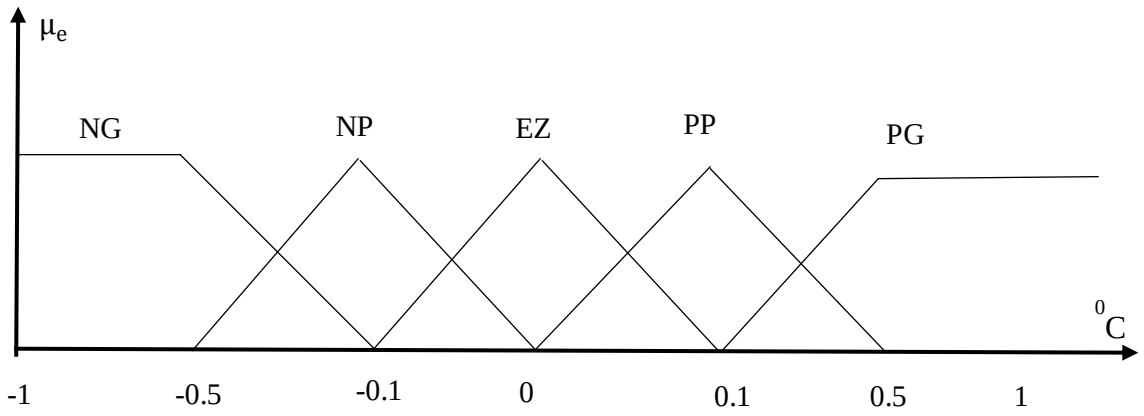
Ud_e: Univers de discours de l'erreur e.

Ud_{Tex}: Univers de discours de température extérieure.

Ud_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.



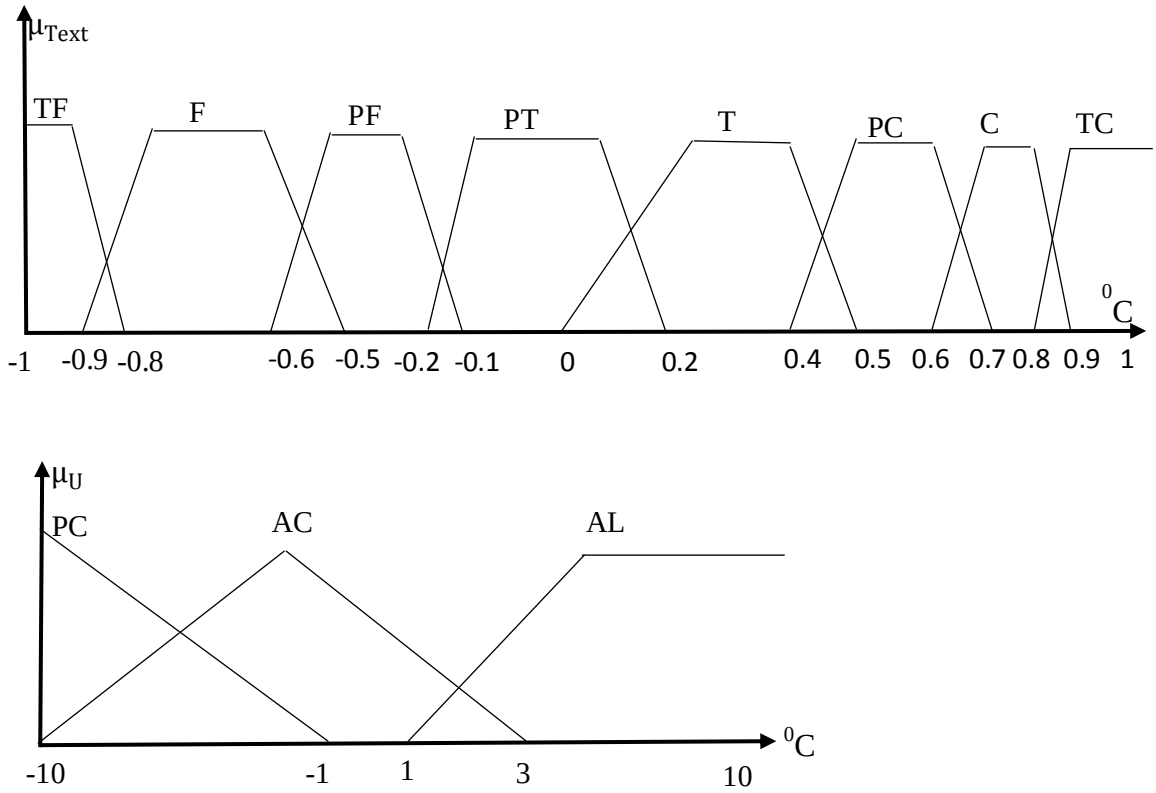


Figure IV.14 : Fonction d'appartenance de température.

• Matrice d'appartenance :

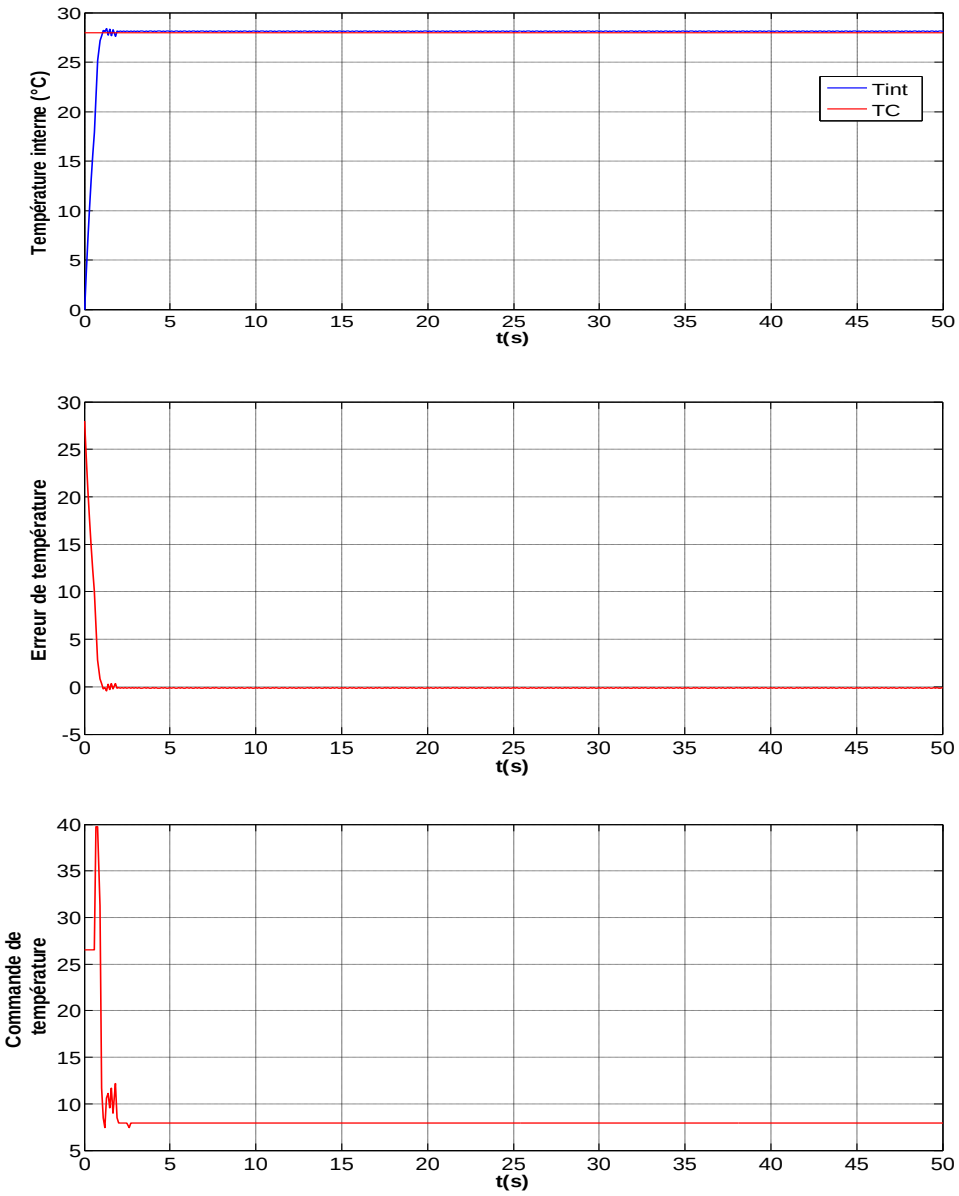
Le nombre de règles pour ce réglage est de l'ordre de 40 règles, comme indique le tableau suivant :

Text / e	TF	F	PF	PT	T	PC	C	TC
NG	PC	PC	PC	PC	PC	PC	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

TableauIV.3: Matrice d'appartenance pour un réglage fin de la température.

• Résultats de simulation

• Régulation sans changement de consigne TC=28°C



FigureIV.15 : Réglage fin de température sans changement de consigne.

• Régulation avec changement de consigne :

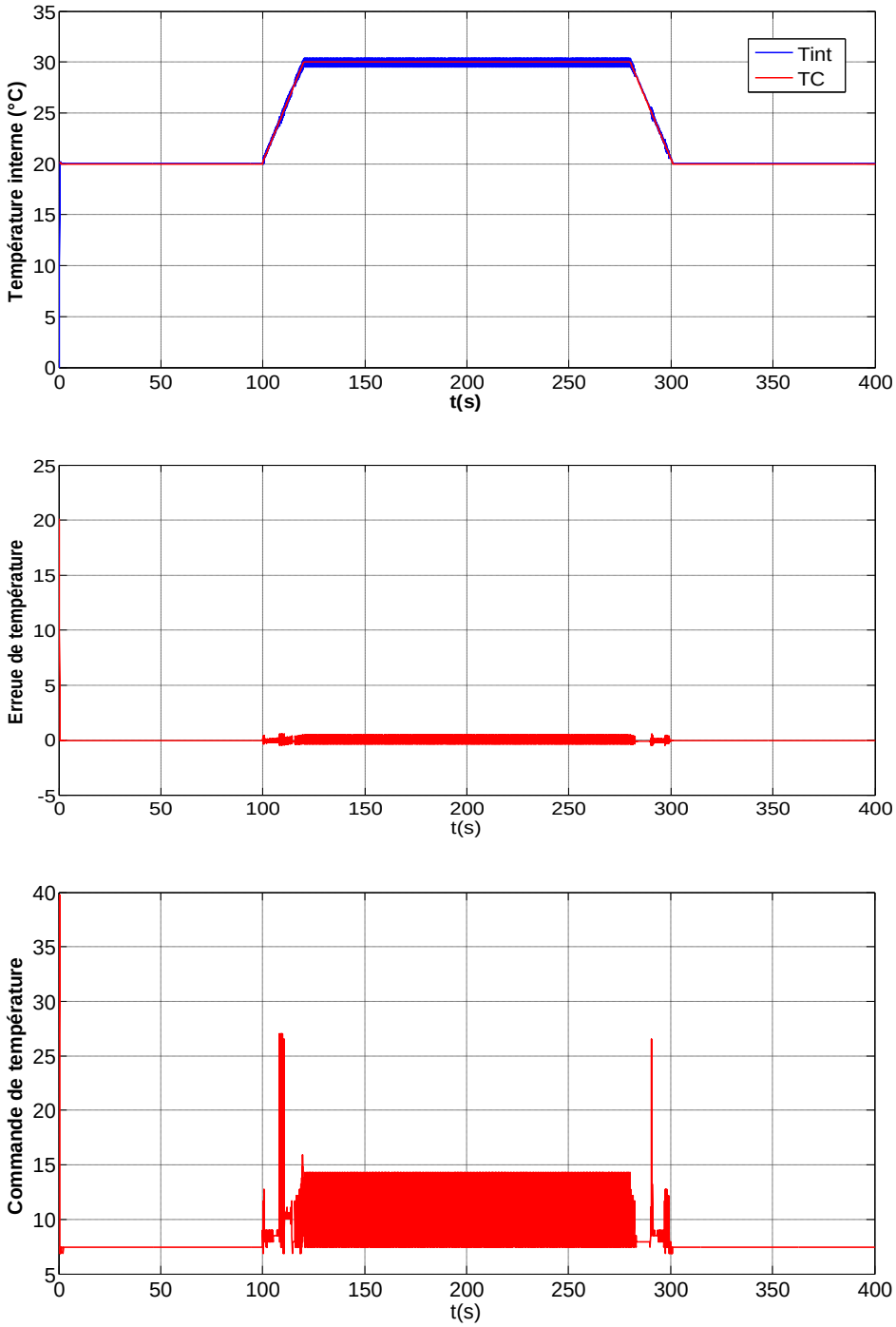


Figure IV.16 : Réglage fin de température avec changement de consigne.

IV.8.2.2. Régulation d'humidité

- **définition des variables de commande**

Nous surveillerons le changement d'humidité à l'intérieur de la serre en regardant les commandes de variables suivantes :

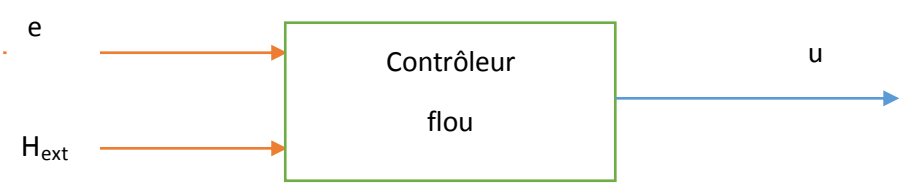


Figure IV.17 : Contrôleur flou du système d'humidification Pour un réglage fin.

• Définition des variables linguistiques

Nous avons les sous-ensembles flous suivants :

• T(e)= {GN, NP, EZ, PP, GP}. Sous-ensemble de l'erreur

GN : Négatives grand. / NP : Négatives petit. / EZ : Environ de zéro. / PP : Positives petit. / PG : Positives grand.

• T (Hext)= {TS, S, PS, HA, PH, H, TH}. Sous-ensemble d'humidité extérieur

TS : Très sec. / S: Sec. / PS: Sec. / HA: Humidité acceptable. / PH: Peu humide. /

H: Humide. / TH: Très humide.

• T (u)= {PC, AC, AL}. Sous-ensemble de la loi de commande

PC : Pas de commande. / AC : Action courte. / AL : Action longue.

• Univers de discours

3 univers de discours aux 3 variables de commande :

Ud_e: [-5, 5]. / Ud_{Hext}: [0, 100]. / Ud_u : [0, 155]

Ud_e: Univers de discours de l'erreur e.

Ud_{Tex}: Univers de discours d'humidité extérieure.

Ud_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 :

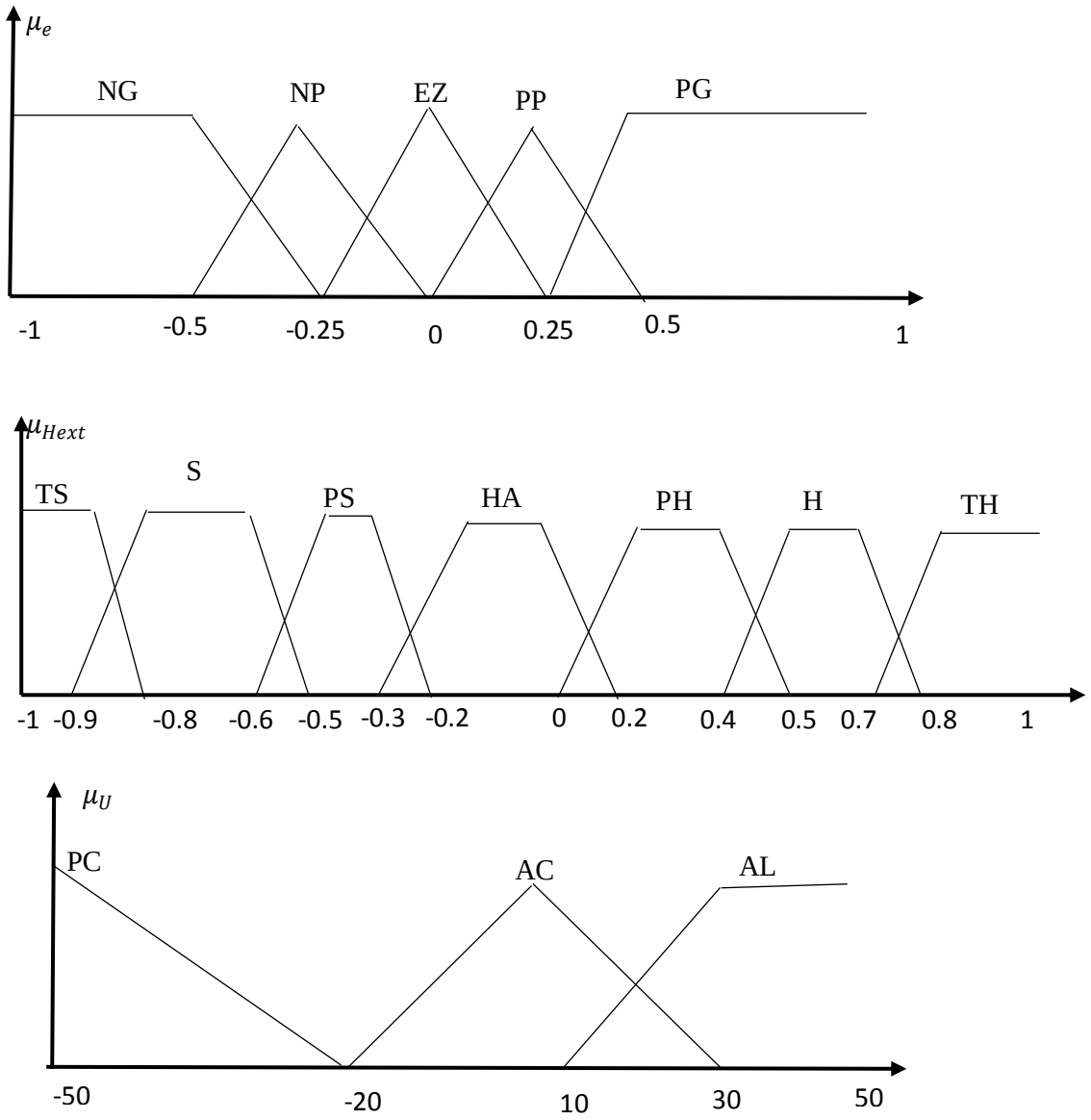


Figure IV.18 : Fonction d'appartenance d'humidité.

• Matrice d'appartenance :

H_{ext} / e	TS	S	PS	HA	PH	H	TH
NG	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC
NP	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC
EZ	AC	AC	AC	AC	PC	PC	AC
PP	AC	AC	AC	AC	PC	PC	AL
PG	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL

Tableau IV.4 : Matrice d'appartenance pour un réglage fin d'humidité

- **Résultats de simulation**
- **Régulation sans changement de consigne HC=75%**

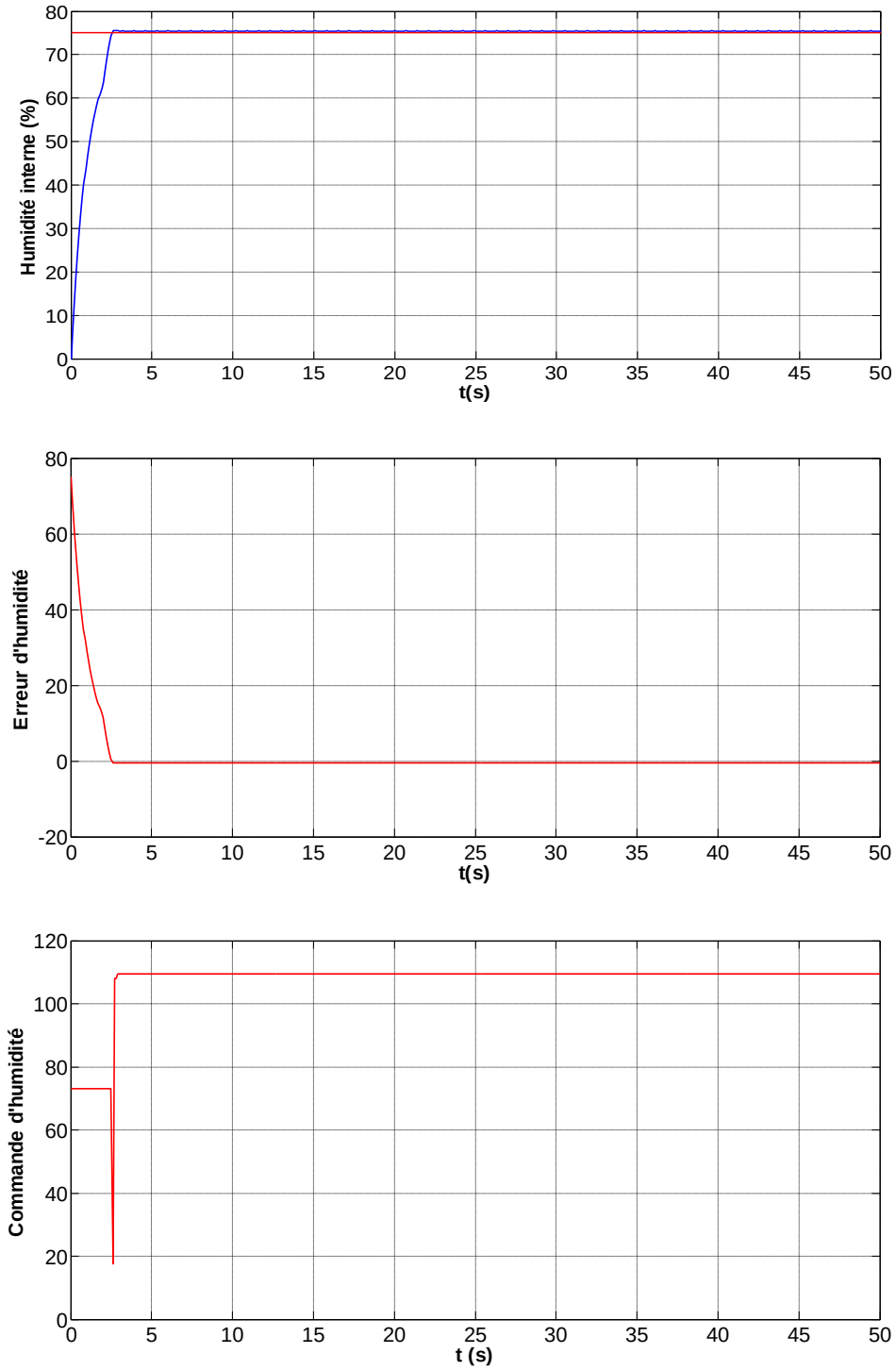


Figure IV.19 : Réglage fin d'humidité sans changement de consigne.

• Régulation avec changement de consigne

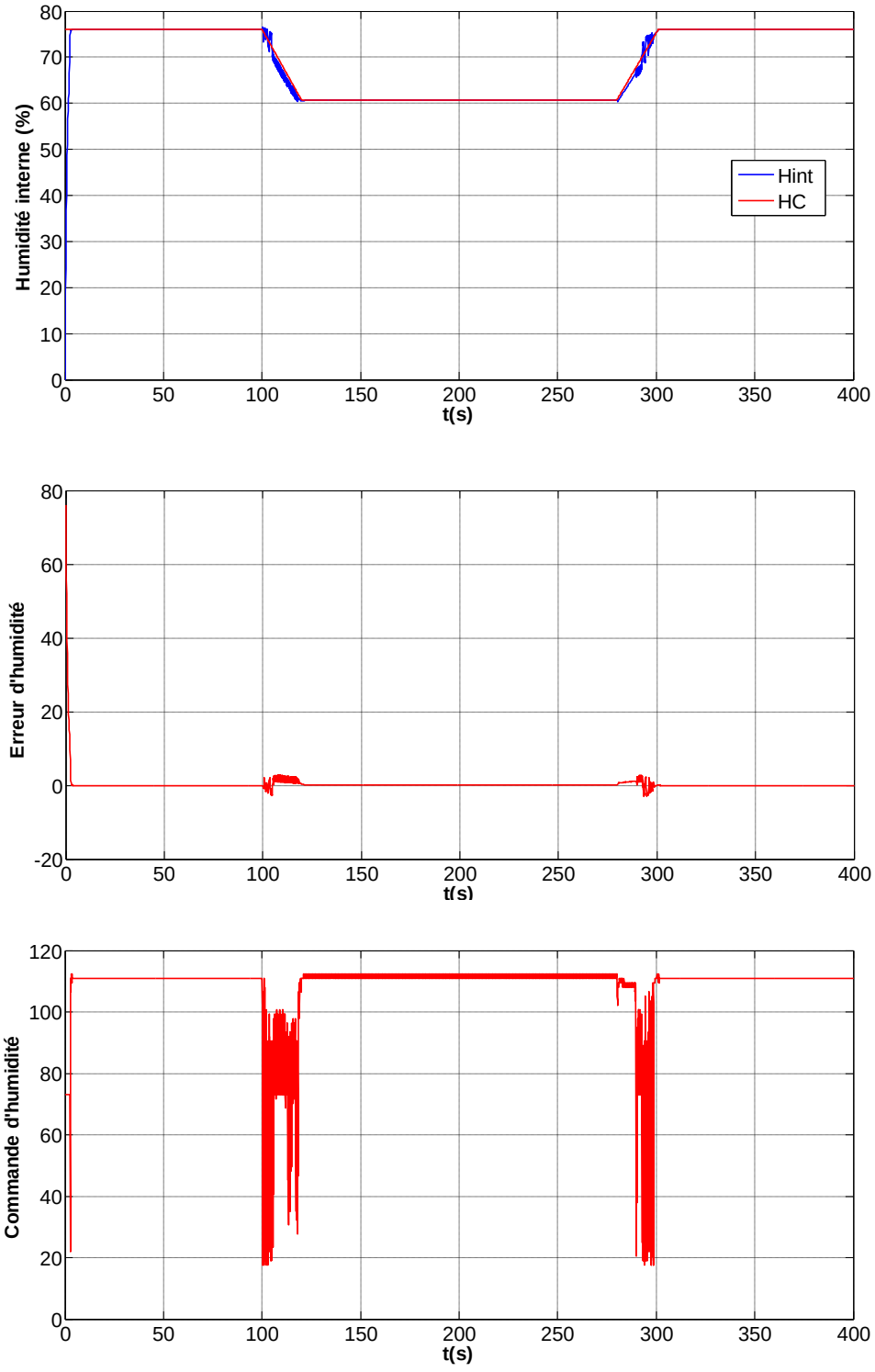


Figure IV.20: Réglage fin d'humidité avec changement de consigne.

III.9.Interprétation

Dans notre simulation en serre avec la logique flou, il nous a permis de déterminer les seuils de température interne et d'humidité interne.

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°C, H_{ext}=82% et R=700Lux.

Pour chaque forme, nous notons que les sorties (Tint, Hint) vont bien selon les instructions requises avec erreur en état constant, mais le temps de réponse pour notre système logique flou est bien.

- Pour réglage grossier :

Temps de réponse thermique interne : 2 min.

Le temps de réponse d'humidité interne : 3 min.

- Pour réglage fin :

Temps de réponse thermique interne : 1.2 min

Le temps de réponse d'humidité interne 2.5 min

IV.10.Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la logique floue en commande. L'accent a particulièrement été mis sur les différentes étapes dans le traitement, des règles d'un contrôleur flou.

Retenons ,que l'intérêt majeur de la logique floue en commande réside dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistiques facilement interprétables.

Les contrôleurs flous se distinguent selon la conclusion de leurs règles; symbolique(contrôleurs de type MAMDANI) ou algébrique (contrôleurs de type SUGENO).

Ilfautfaireprêteruneattentionparticulière,lorsdelasynthèsedurégulateur flou:

- Annombreetsurtoutàlarépartitiondesfonctionsd'appartenancesurl'universdediscours.
- A la table des règles.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans les travaux en cours, nous avons essayé de concevoir un système automatique permettant de suivre les différences de paramètres ayant un impact direct sur la production agricole et de les adapter aux besoins des plantes agricoles, afin d'accroître la qualité et la quantité des produits agricoles résultant de la culture en serre, et pour faire face à un marché très concurrentiel.

L'étude menée dans le cadre de ce travail de Master est dédiée à l'analyse de l'influence des paramètres thermiques et géométriques de la serre. Ceci doit contribuer à la compréhension et à l'analyse des différents phénomènes notamment la température et humidité mise en jeu à l'intérieur d'une serre sous un climat sec et chaud.

Comme début, nous avons identifié les critères les plus importants pour la croissance en serre. Pour mener à bien nos travaux et améliorer nos connaissances agricoles, nous avons mis au point les technologies les plus récentes dans les types de serres les plus courants et les divers composants nécessaires à la gestion efficace des paramètres climatiques. Cette connaissance nous a ensuite aidés à mettre au point une régulation du climat conforme aux spécifications du cahier des charges.

Le climat à l'intérieur d'une serre agricole est un système dynamique très complexe, la température et l'humidité à l'intérieur sont non linéaires et fortement couplées par les lois de la thermodynamique, par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de contrôle précises et fortes, pour cela, nous avons utilisé deux types de contrôle, le contrôle par logique flou et le contrôle PD0F, qui ont donné des résultats très acceptables et en temps réel.

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 ensachant que le délai peut affecter le procédé de linéarisation Feedback et Feedforward endégradant 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

Conclusion générale

système en boucle fermée, dans ce casles résultats se sont montrés très satisfaisants entre la réaction de notre système et l'exécution de Feedback et Feedforward.

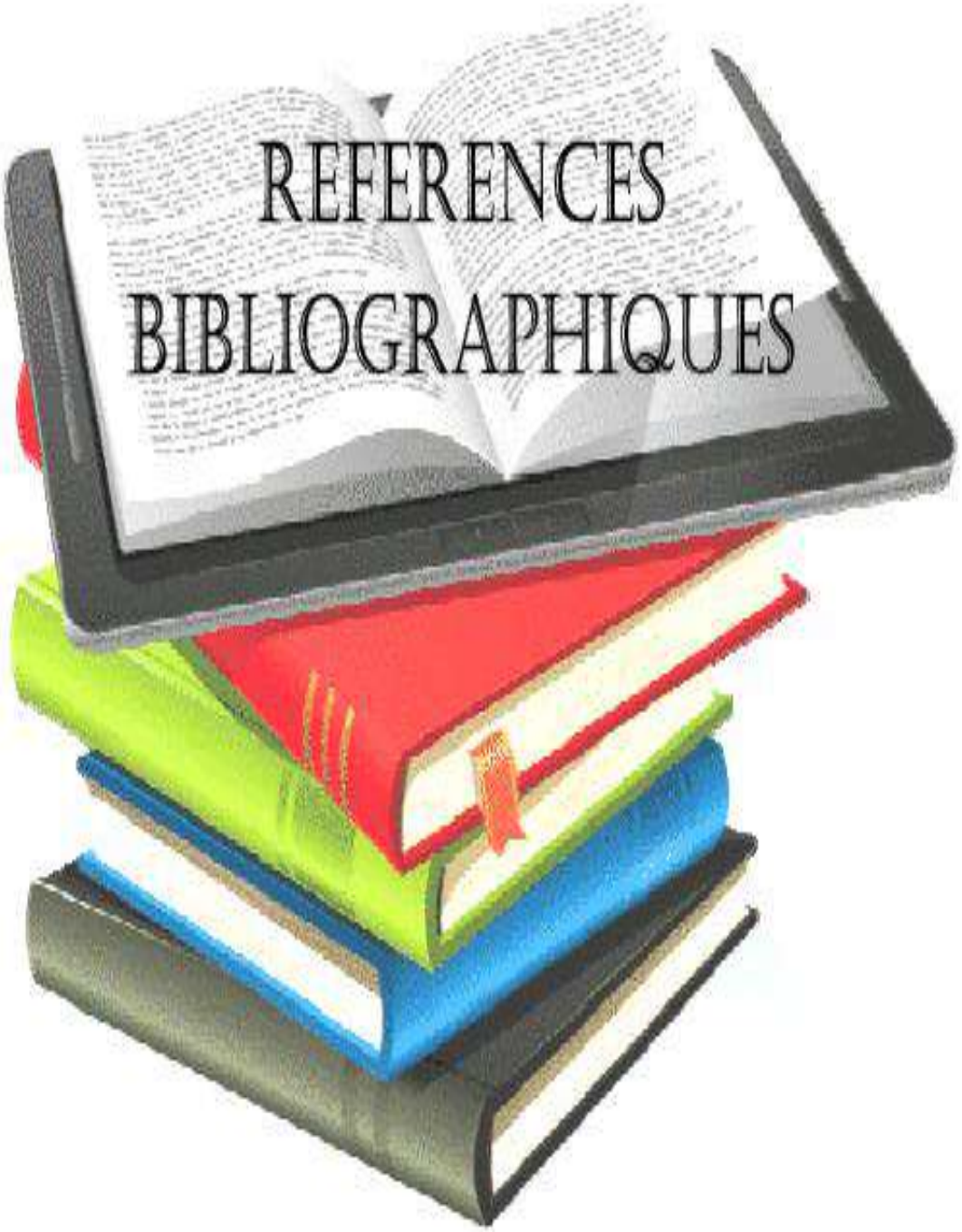
Cependant l'inconvénient majeur de ce type de contrôleur, vient des réponses très lentes qu'il produit (réponses pouvant atteindre des durées allant de 23 à 24 min) pour réguler la température et l'humidité.

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 1.2 à 3 min pour réguler convenablement la température et l'humidité.

L'accent a été particulièrement mis sur les différentes étapes dans le traitement d'un contrôleur flou. Pour montrer son utilité on a présenté un exemple simple dans lequel on montre l'efficacité de la commande floue par rapport à La commande PDOF.

Retenons que l'intérêt majeur de la logique floue en commande réside dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle en un ensemble de règles linguistiques facilement applicables.

Ensuite nous avons exposé notre travail qui consiste en la régulation de la température d'une serre. Les résultats de simulation que nous avons obtenus ont illustré l'efficacité de la commande floue à travers les caractéristiques de la réponse. Ce type de régulateur possède un meilleur temps de monté et une réponse rapide. Les résultats de simulation obtenus en variant le temps de retard montrent la robustesse du contrôleur floue.


REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[1] **BEN SAIDJ** Zahia (2018). Gestion d'une serre agricole à base d'ARDUINO, Mémoire de Master en Electronique, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

[2] **K. Mesmoudi,** "Etude Expérimentale et Numérique de la Température et de l'Humidité de l'Air d'un Abri Serre Installé dans les Haut Plateaux d'Algérie, Région des Aurès," Thèse de Doctorat Physique Energétique, option énergétique Université de Batna, 2010.

[3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Serre

[4] **H. Ait Bouh**, "Conception, développement et mise en place d'un système de pilotage automatique du climat et de la fertirrigarion goutte à goutte sous serre Thèse de Doctorat", Faculté des Sciences, Mejnès, 2003.

[5] **Y. Bouteraa**, "Automatisation d'une serre agricole, " Magister en Sciences agronomique, école nationale supérieur d'agronomie El-Harrach, 2012 .

[6] **Andre, M; Marc, S**." Livre: Physique de sol, France (1991).Baille A, INRA et les cultures sous serre". Vers l'utilisation rationnelle de l'énergie et la maîtrise des conditions climatiques/INRA (Paris-France)- 1995 .

[7] **Mme LEBBAL** Fatiha. "Contribution à l'étude dynamique et thermique de l'air à l'intérieur d'une serre en verre de type Venlo dans les régions des Aurès; les hauts plateaux est d'Algérie (Etude de simulation)". Thèse de doctorat de Science en Mécanique énergétique Université El-Hadj Lakhdar Batna. (2010) .

[8] **Djeghel** Rachida."Modélisation thermique d'une serre agricole". Thèse de magister Département de physique. Université de Ouargla (2004).

[9] **Bertol, L; Bourges, B**."Données climatique utilisée dans les bâtiments". (B2015) Technique de l'ingénieur France, 1992.

[10] **Bartzanas, T; Boulard, T; Kittas ,C**."Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse". Biosystems Engineering, INRAE France (2004)88(4), 479-490.

[11] **Boulard, T**."Caractérisation et modélisation du climat des serres: Application à la climatisation estivale".Thèse de doctorat. Ecole National Supérieure Agronomique de Montpellier (1996).

[12] **Haxaire** Renaud. " Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre" Thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis. (1999).

Références bibliographiques

[13] **LEBIK** Slimane. "Simulation a l'aide du code de calcule CFD des mécanisme jeu dans le refroidissement évaporait combine au renouvellement d'air dans une serre". thèse de MAGISTERE En génie mécanique option thermofluides . Université mouloud Mammeri de Tizi ouzou (2008).

[14] **Ould Khaoua** Sid Ali. "Modélisation De L'aération Naturelle Et Du Microclimat Des Serres EN Verre De Grande Portée Sous Climat Tempéré Océanique".Thèse de doctorat, École Doctorale D'angers (2006) .

[15] **Boulard, T.Draoui B**. "Natural ventilation Of a greenhouse with Continuous roof Vents: Measurement and Data Analysis". J.agric. Engng Res. INRA station de bioclimatologie. France (1995) 61, 27-36.

[16] http://www.acd-serres.fr/fr-8825-4813-6707-sitemap-chauffage-serre.html

[17] **Valléres, Marise**. "Comparaison de méthodes de refroidissement et de déshumidification pour une production en serre de tomates biologiques". Maîtrise en génie agroalimentaire Québec, Canada 2018.

[18] https://richel-group.fr/produits/refroidissement.

[19] **I .Telli**, "Gestion Automatique d'une Serre Agricole", Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme MASTER, Université de Biskra 2015.

[20] **GAC A., BARTOLI R., FILLE J. F., BETHERY J., GERARD A. et FELDMANNC**.,« Echanges thermiques dans les serres», Bulletin Technique du Génie Rural, France, 1973.

[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] **G.D. Pasgianos, K.G. Arvanitis, P. Polycarpou, N. Sigrimis**, « A nonlinear Feedback technique for greenhouse Environnemental Control»,2003 , Computers and Electronics in Agriculture, vol: 40, pp : 153-177.

[23] **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.

[24] **Young, P.C., Lees, M.J.** «The Active Mixing Volume (AMV): A New Concept in Modelling Environmental Systems. Statistics for the Environment», 1993,.

[25] **G.D. Pasgianos, K.G. Arvanitis, P. Polycarpou, N. Sigrimis**, « A nonlinear Feedback technique for greenhouse Environnemental Control»,2003 , Computers and Electronics in Agriculture, vol: 40, pp : 153-177.

Références bibliographiques

[26] **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.

[27] **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.

[28] **Arvanitis, K.G., Paraskevopoulos, P.N., Vernardos,** «Multirate adaptive temperature control of greenhouses», Comput. Electron. Agric, 2000, Vol: 26, pp: 303- 320.

[29] **Michel** Bonvin**, Gilbert** Morand**, Antoin** Reist « Horticole intégration des processus énergétiques dans les culture sous abri » Nov2005.

[30] **M.Neil,** « Nonlinear control system », 2003, springer, berlin IBSN: 0-8247-4112 -9.

[31] **Euldji** bilel **, Medjber.A** , «commande d'un chariot par logique floue».projet de fin d'études, Département Electronique de Blida, Session octobre2000.

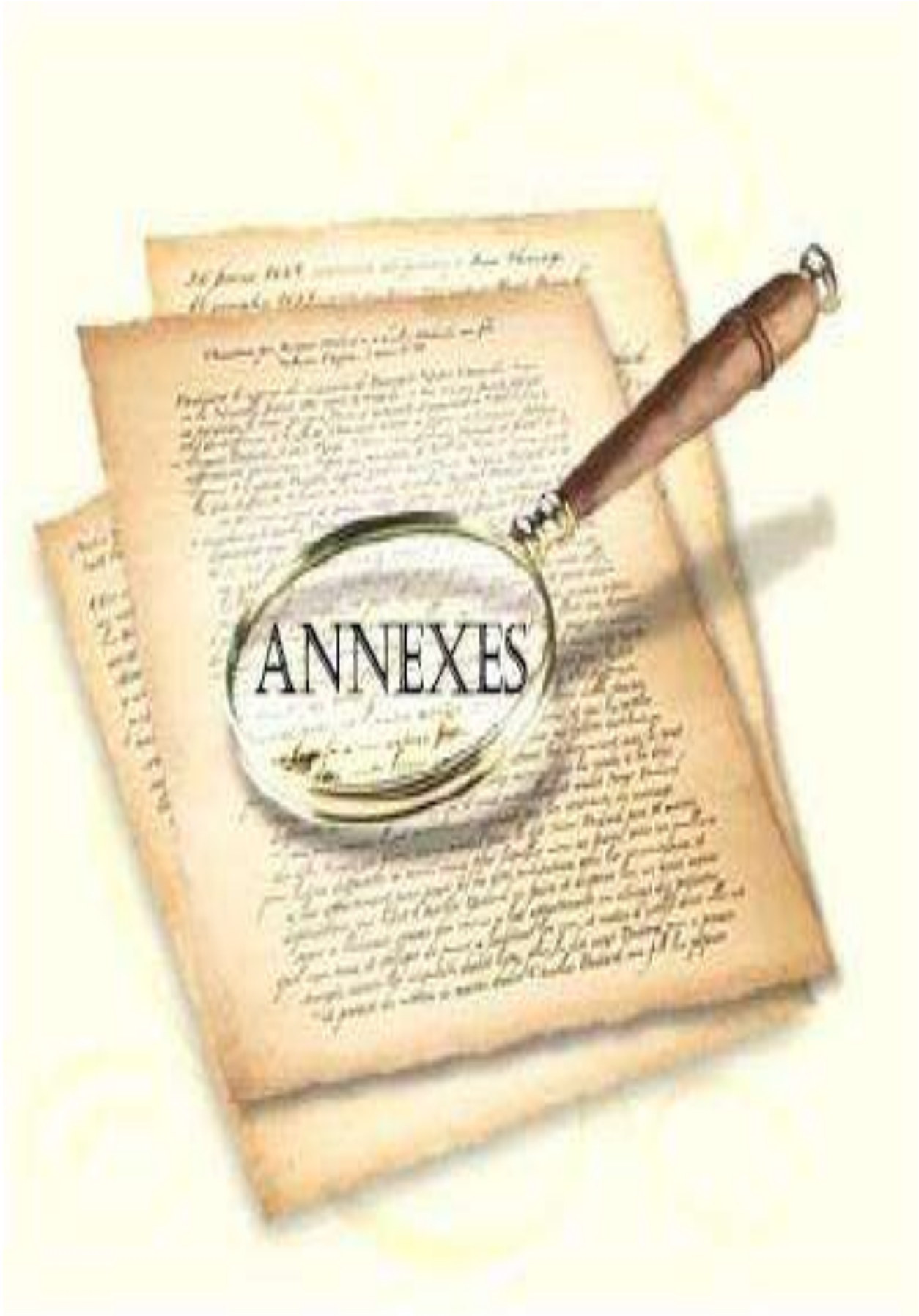
[32] **K. Chao, R. S. Gates, N. Sigrimis** « Fuzzy logic controller design for staged heating and ventilating systems» Transaction of the ASAE 0001-2351-00-4306-1885, 2001, vol: 43, pp: 1885-1894.

[33] https://www.thermexcel.com/french/tables/massair.htm

[34] **Dr. Medjber** Ahmed «Automatisation d'une serre agricole».Mémoire de magister, , Département Electronique de Blida , Session juin 2008.

[35] **Melle Belhouane** Souhila , «Étude et simulation d'une régulation thermique par la logique floue » Université ABDERRAHMANE MIRA de Bejaia 2014.

[36] https://actudactuaires.typepad.com/files/principe-de-la-logique-floue-1.pdf


ANNEXES

Annexes

1/ Théorie sur la chaleur spécifique et la densité de l'air :

A/Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique Cp d'un corps (ou capacité thermique massique) est la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse du corps.

L'unité légale est donc le joule par kilogramme-kelvin ($J.kg^{-1}.K^{-1}$).
En fait on a $Cp = \lim (\Delta Q / M.\Delta T)$ si ΔT tend vers 0.

La chaleur spécifique de l'eau est C_{peau} = 4186 Joule/kg K (à 0° C et conditions de pression normale).

La chaleur spécifique de l'air est C_{pair} = 1 004 Joule/kg K.

Pour déterminer Cp, on utilise un calorimètre adiabatique (vase Dewar en verre ou en acier inoxydable) qui contient une masse m d'eau à la température t. On porte une masse M du corps à étudier à la température T > t puis on plonge le corps dans le calorimètre et on attend que la température se stabilise à la valeur Tf.

Dans l'état initial, on a Q1 = (m+mcal).Cpeau.t + M.Cp.T

Dans l'état final, on a : Q2 = (m+mcal).Cpeau.Tf + M.Cp.Tf.

Si le calorimètre est adiabatique, on a Q1 = Q2. DE la mesure de Tf, on peut déduire Cp.

Remarque :

La capacité thermique massique d'un solide est maintenant déterminée avec un appareil d'analyse thermo-différentielle qui permet des mesures plus rapides et plus précises que la méthode historique décrite ici.

B/Masse volumique (kg/m^{3}d'air humide) : [33]

MASSE VOLUMIQUE en kg/m3 d'air humide : C'est la masse d'un m3 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 m3 d'air humide, on retrouve la somme des masses de constituants, c'est la somme des masses volumiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, aux pressions partielles et températures 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	1% Hr
-10 °C	1,340	1,340	1,340	1,340	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341

Annexes

-9 °C	1,335	1,335	1,335	1,335	1,335	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336
-8 °C	1,330	1,330	1,330	1,330	1,330	1,330	1,331	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	1,326
-6 °C	1,319	1,320	1,320	1,320	1,320	1,320	1,321	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	1,316
-4 °C	1,309	1,309	1,310	1,310	1,310	1,310	1,311	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	1,307
-2 °C	1,299	1,299	1,300	1,300	1,300	1,301	1,301	1,301	1,301	1,302	1,302
-1 °C	1,294	1,295	1,295	1,295	1,295	1,296	1,296	1,296	1,296	1,297	1,297
0 °C	1,289	1,290	1,290	1,290	1,290	1,291	1,291	1,291	1,292	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	1,288
2 °C	1,279	1,280	1,280	1,281	1,281	1,281	1,282	1,282	1,282	1,283	1,283
3 °C	1,275	1,275	1,275	1,276	1,276	1,276	1,277	1,277	1,277	1,278	1,278
4 °C	1,270	1,270	1,271	1,271	1,271	1,272	1,272	1,272	1,273	1,273	1,274
5 °C	1,265	1,265	1,266	1,266	1,267	1,267	1,267	1,268	1,268	1,269	1,269
6 °C	1,260	1,261	1,261	1,261	1,262	1,262	1,263	1,263	1,264	1,264	1,264
7 °C	1,255	1,256	1,256	1,257	1,257	1,258	1,258	1,259	1,259	1,260	1,260
8 °C	1,250	1,251	1,251	1,252	1,252	1,253	1,253	1,254	1,254	1,255	1,255
9 °C	1,246	1,246	1,247	1,247	1,248	1,248	1,249	1,249	1,250	1,251	1,251
10 °C	1,241	1,241	1,242	1,243	1,243	1,244	1,244	1,245	1,245	1,246	1,247
11 °C	1,236	1,237	1,237	1,238	1,239	1,239	1,240	1,240	1,241	1,242	1,242
12 °C	1,231	1,232	1,233	1,233	1,234	1,235	1,235	1,236	1,237	1,237	1,238
13 °C	1,227	1,227	1,228	1,229	1,229	1,230	1,231	1,231	1,232	1,233	1,234
14 °C	1,222	1,223	1,223	1,224	1,225	1,226	1,226	1,227	1,228	1,229	1,229
15 °C	1,217	1,218	1,219	1,220	1,220	1,221	1,222	1,223	1,223	1,224	1,225
16 °C	1,212	1,213	1,214	1,215	1,216	1,217	1,217	1,218	1,219	1,220	1,221
17 °C	1,208	1,209	1,210	1,210	1,211	1,212	1,213	1,214	1,215	1,216	1,217
18 °C	1,203	1,204	1,205	1,206	1,207	1,208	1,209	1,210	1,211	1,211	1,212
19 °C	1,198	1,199	1,200	1,201	1,202	1,203	1,204	1,205	1,206	1,207	1,208
20 °C	1,194	1,195	1,196	1,197	1,198	1,199	1,200	1,201	1,202	1,203	1,204
21 °C	1,189	1,190	1,191	1,192	1,193	1,194	1,196	1,197	1,198	1,199	1,200
22 °C	1,184	1,185	1,187	1,188	1,189	1,190	1,191	1,192	1,194	1,195	1,196

Annexes

23 °C	1,179	1,181	1,182	1,183	1,184	1,186	1,187	1,188	1,189	1,191	1,192
24 °C	1,175	1,176	1,177	1,179	1,180	1,181	1,183	1,184	1,185	1,187	1,188
25 °C	1,170	1,171	1,173	1,174	1,176	1,177	1,178	1,180	1,181	1,183	1,184
26 °C	1,165	1,167	1,168	1,170	1,171	1,173	1,174	1,176	1,177	1,178	1,180
27 °C	1,160	1,162	1,164	1,165	1,167	1,168	1,170	1,171	1,173	1,174	1,176
28 °C	1,156	1,157	1,159	1,161	1,162	1,164	1,165	1,167	1,169	1,170	1,172
29 °C	1,151	1,153	1,154	1,156	1,158	1,160	1,161	1,163	1,165	1,166	1,168
30 °C	1,146	1,148	1,150	1,151	1,153	1,155	1,157	1,159	1,161	1,163	1,164
31 °C	1,141	1,143	1,145	1,147	1,149	1,151	1,153	1,155	1,157	1,159	1,161
32 °C	1,136	1,138	1,140	1,142	1,144	1,146	1,149	1,151	1,153	1,155	1,157
33 °C	1,131	1,133	1,136	1,138	1,140	1,142	1,144	1,146	1,149	1,151	1,153
34 °C	1,126	1,129	1,131	1,133	1,136	1,138	1,140	1,142	1,145	1,147	1,149
35 °C	1,121	1,124	1,126	1,129	1,131	1,133	1,136	1,138	1,141	1,143	1,145
36 °C	1,116	1,119	1,122	1,124	1,127	1,129	1,132	1,134	1,137	1,139	1,142
37 °C	1,111	1,114	1,117	1,119	1,122	1,125	1,127	1,130	1,133	1,135	1,138
38 °C	1,106	1,109	1,112	1,115	1,118	1,120	1,123	1,126	1,129	1,132	1,134
39 °C	1,101	1,104	1,107	1,110	1,113	1,116	1,119	1,122	1,125	1,128	1,131
40 °C	1,096	1,099	1,102	1,105	1,109	1,112	1,115	1,118	1,121	1,124	1,127
41 °C	1,091	1,094	1,098	1,101	1,104	1,107	1,111	1,114	1,117	1,120	1,124
42 °C	1,086	1,089	1,093	1,096	1,099	1,103	1,106	1,110	1,113	1,117	1,120
43 °C	1,081	1,084	1,088	1,091	1,095	1,099	1,102	1,106	1,109	1,113	1,116
44 °C	1,075	1,079	1,083	1,087	1,090	1,094	1,098	1,102	1,105	1,109	1,113
45 °C	1,070	1,074	1,078	1,082	1,086	1,090	1,094	1,098	1,102	1,106	1,109
46 °C	1,064	1,069	1,073	1,077	1,081	1,085	1,089	1,094	1,098	1,102	1,106
47 °C	1,059	1,063	1,068	1,072	1,076	1,081	1,085	1,089	1,094	1,098	1,103
48 °C	1,053	1,058	1,063	1,067	1,072	1,076	1,081	1,085	1,090	1,095	1,099
49 °C	1,048	1,053	1,057	1,062	1,067	1,072	1,077	1,081	1,086	1,091	1,096
50 °C	1,042	1,047	1,052	1,057	1,062	1,067	1,072	1,077	1,082	1,087	1,092
51 °C	1,036	1,042	1,047	1,052	1,057	1,063	1,068	1,073	1,078	1,084	1,089
52 °C	1,030	1,036	1,041	1,047	1,053	1,058	1,064	1,069	1,075	1,080	1,086
53 °C	1,025	1,030	1,036	1,042	1,048	1,053	1,059	1,065	1,071	1,076	1,082
54 °C	1,019	1,025	1,031	1,037	1,043	1,049	1,055	1,061	1,067	1,073	1,079

Annexes

55 °C	1,012	1,019	1,025	1,031	1,038	1,044	1,050	1,057	1,063	1,069	1,076
56 °C	1,006	1,013	1,020	1,026	1,033	1,039	1,046	1,053	1,059	1,066	1,072
57 °C	1,000	1,007	1,014	1,021	1,028	1,035	1,042	1,048	1,055	1,062	1,069
58 °C	0,994	1,001	1,008	1,015	1,023	1,030	1,037	1,044	1,051	1,059	1,066
59 °C	0,987	0,995	1,002	1,010	1,017	1,025	1,033	1,040	1,048	1,055	1,063
60 °C	0,981	0,989	0,997	1,004	1,012	1,020	1,028	1,036	1,044	1,052	1,060
61 °C	0,974	0,982	0,991	0,999	1,007	1,015	1,023	1,032	1,040	1,048	1,056
62 °C	0,967	0,976	0,985	0,993	1,002	1,010	1,019	1,027	1,036	1,045	1,053
63 °C	0,960	0,969	0,978	0,987	0,996	1,005	1,014	1,023	1,032	1,041	1,050
64 °C	0,953	0,963	0,972	0,982	0,991	1,000	1,010	1,019	1,028	1,038	1,047
65 °C	0,946	0,956	0,966	0,976	0,985	0,995	1,005	1,015	1,024	1,034	1,044
66 °C	0,939	0,949	0,959	0,970	0,980	0,990	1,000	1,010	1,020	1,031	1,041
67 °C	0,932	0,942	0,953	0,964	0,974	0,985	0,995	1,006	1,017	1,027	1,038
68 °C	0,924	0,935	0,946	0,957	0,968	0,979	0,991	1,002	1,013	1,024	1,035
69 °C	0,917	0,928	0,940	0,951	0,963	0,974	0,986	0,997	1,009	1,020	1,032
70 °C	0,909	0,921	0,933	0,945	0,957	0,969	0,981	0,993	1,005	1,017	1,029
71 °C	0,901	0,913	0,926	0,938	0,951	0,963	0,976	0,988	1,001	1,013	1,026
72 °C	0,893	0,906	0,919	0,932	0,945	0,958	0,971	0,984	0,997	1,010	1,023
73 °C	0,885	0,898	0,912	0,925	0,939	0,952	0,966	0,979	0,993	1,006	1,020
74 °C	0,876	0,890	0,904	0,918	0,932	0,947	0,961	0,975	0,989	1,003	1,017
75 °C	0,868	0,882	0,897	0,912	0,926	0,941	0,955	0,970	0,985	0,999	1,014
76 °C	0,859	0,874	0,889	0,905	0,920	0,935	0,950	0,965	0,981	0,996	1,011
77 °C	0,850	0,866	0,882	0,898	0,913	0,929	0,945	0,961	0,976	0,992	1,008
78 °C	0,841	0,857	0,874	0,890	0,907	0,923	0,940	0,956	0,972	0,989	1,005
79 °C	0,832	0,849	0,866	0,883	0,900	0,917	0,934	0,951	0,968	0,985	1,002
80 °C	0,822	0,840	0,858	0,875	0,893	0,911	0,929	0,946	0,964	0,982	1,000
81 °C	0,813	0,831	0,849	0,868	0,886	0,905	0,923	0,941	0,960	0,978	0,997
82 °C	0,803	0,822	0,841	0,860	0,879	0,898	0,917	0,937	0,956	0,975	0,994
83 °C	0,793	0,813	0,832	0,852	0,872	0,892	0,912	0,932	0,951	0,971	0,991
84 °C	0,783	0,803	0,824	0,844	0,865	0,885	0,906	0,927	0,947	0,968	0,988
85 °C	0,772	0,793	0,815	0,836	0,857	0,879	0,900	0,922	0,943	0,964	0,986
86 °C	0,761	0,784	0,806	0,828	0,850	0,872	0,894	0,916	0,939	0,961	0,983

Annexes

87 °C	0,750	0,773	0,796	0,819	0,842	0,865	0,888	0,911	0,934	0,957	0,980
88 °C	0,739	0,763	0,787	0,811	0,835	0,858	0,882	0,906	0,930	0,954	0,977
89 °C	0,728	0,753	0,777	0,802	0,827	0,851	0,876	0,901	0,925	0,950	0,975
90 °C	0,716	0,742	0,767	0,793	0,819	0,844	0,870	0,895	0,921	0,946	0,972
91 °C	0,704	0,731	0,757	0,784	0,810	0,837	0,863	0,890	0,916	0,943	0,969
92 °C	0,692	0,720	0,747	0,775	0,802	0,829	0,857	0,884	0,912	0,939	0,967
93 °C	0,680	0,708	0,737	0,765	0,794	0,822	0,850	0,879	0,907	0,936	0,964
94 °C	0,667	0,697	0,726	0,756	0,785	0,814	0,844	0,873	0,903	0,932	0,961
95 °C	0,654	0,685	0,715	0,746	0,776	0,807	0,837	0,867	0,898	0,928	0,959
96 °C	0,641	0,673	0,704	0,736	0,767	0,799	0,830	0,862	0,893	0,925	0,956
97 °C	0,628	0,660	0,693	0,725	0,758	0,791	0,823	0,856	0,888	0,921	0,954
98 °C	0,614	0,648	0,681	0,715	0,749	0,782	0,816	0,850	0,884	0,917	0,951
99 °C	0,600	0,635	0,669	0,704	0,739	0,774	0,809	0,844	0,879	0,914	0,948
100 °C	0,585	0,621	0,657	0,693	0,730	0,766	0,802	0,838	0,874	0,910	0,946

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

2/ 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 :

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{\rho.\mathrm{Cp}.\mathrm{Vt}}(Q_{Ch} + R - \lambda.H_{Br}) - \frac{\mathrm{Vv,m}}{\mathrm{Vt}}(T_{int} - T_{ext}) - \frac{UA}{\rho.\mathrm{Cp}.\mathrm{Vt}}(T_{int} - T_{ext})$$

$$\frac{dH_{int}}{dt} = \frac{1}{\rho.V_H}H_{Br} - \frac{1}{\rho.V_H}E(R, H_{int}) - \frac{\mathrm{Vv,m}}{\rho.V_H}(H_{int} - H_{ext})$$

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

$$E\big(R(t), H_{int}(t)\big) = \alpha\frac{R(t)}{\lambda} - \beta_t.H_{int}(t)$$

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{\rho.\mathrm{Cp}.\mathrm{Vt}}\big(R(t) - \lambda.H_{Br}(t)\big) - \frac{\mathrm{Vv,m(t)}}{\mathrm{Vt}}\big(T_{int}(t) - T_{ext}(t)\big) - \frac{UA}{\rho.\mathrm{Cp}.\mathrm{Vt}}$$

Annexes

$$(T_{int}(t) - T_{ext}(t))$$

$$\frac{dH_{int}}{dt} = \frac{\beta t}{\rho.V} H_{int} - \frac{1}{\rho.V} H_{Br} + \alpha \frac{R}{\lambda V} - \frac{Vv,m}{\rho.V}(H_{int} - H_{ext})$$

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 :

$$[X_1 \quad X_2]^T = [T_{int} H_{int}]^T$$
$$[U_1 \quad U_2]^T = [V_{v.m} H_{Br}]^T$$
$$[V_1 V_2 V_3]^T = [R \quad T_{ext} H_{ext}]^T$$

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{1}{\rho.Cp.V}(V_1 - \lambda.U_2) - \frac{U_1}{V}(X_1 - V_3) - \frac{UA}{\rho.Cp.V}(X_1 - V_2)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = -\frac{\beta t}{\rho.V} X_2 - \frac{1}{\rho.V} U_2 + \alpha \frac{V_1}{\lambda V} - \frac{U_1}{\rho.V}(X_2 - V_3)$$

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

$$f_2(X, V) = -\frac{\beta t}{\rho.V} X_2 + \frac{\alpha}{\lambda \rho V} V_1$$

$$g_1(X, V) = \left[\frac{1}{V}(V_2 - X_1) \qquad -\frac{\lambda}{\rho.Cp.V}\right]$$

$$g_2(X, V) = \left[\frac{1}{\rho.V}(V_3 - X_2) \frac{1}{\rho.V}\right]$$

Annexes

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

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

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

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

le système en boucle fermée prend la forme :

$$Ui\text{et } Yi;\ \mathrm{i} = 1{,}2$$

Ou sous la forme de fonction de transfert :

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

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

$$\det = \frac{Q(t)}{\rho.\mathrm{Cp}.\mathrm{V}}$$

$$D^{-1} = \frac{1}{det}\begin{bmatrix} 1 & \frac{\lambda}{\mathrm{Cp}} \\ (X_2 - V_3)\rho(V_2 - X_1) & \end{bmatrix}$$

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

Avec :

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

Annexes

$$U = D^{-1}\{-f + \widehat{U}\}$$

$$= Q^{-1}\begin{bmatrix} \rho c_p V & \lambda\rho V \\ -\rho c_p V(V_3 - X_2) & \rho^2 c_p V(V_2 - X_1) \end{bmatrix}\left\{ + \begin{bmatrix} -\frac{UA}{\rho c_p V}(V_2 - X_1) - \frac{1}{\rho c_p V}V_1 \\ \frac{\beta_t}{\rho V}X_2 - \frac{\alpha}{\lambda\rho V}V_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_1}X_1(t) + \frac{1}{\tau_1}\hat{u}_1 \\ -\frac{1}{\tau_2}X_2(t) + \frac{1}{\tau_2}\hat{u}_2 \end{bmatrix}\right\}$$

$$f_1(x,v) = \frac{UA}{\rho c_p V}(V_2 - X_1) - \frac{1}{\rho c_p V}V_1$$

$$f_1(x,v) = \frac{\beta_t}{\rho V}X_2 - \frac{\alpha}{\lambda\rho V}V_1$$

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

$$U_1 = Q^{-1}\left[\frac{\rho C_P V}{\tau_1}\tilde{u}_1 + \frac{\lambda\rho V}{\tau_2}\tilde{u}_2 - (\alpha+1)V_1 - UA * V_2 + \left(UA - \frac{\rho c_p V}{\tau_1}\right)X_1 + (\lambda\beta_t - \frac{\lambda\rho V}{\tau_2})X_2\right]$$

$$U_2 = Q^{-1}(V_3 - X_2)\left[-\frac{\rho c_p V}{\tau_1}\tilde{u}_1 + V_1 - \left(UA - \frac{\rho c_p V}{\tau_1}\right)X_1 + UA * V_2\right] + Q^{-1}(V_2 - X_1)\left[\frac{\rho^2 c_p V}{\tau_2}\tilde{u}_2 - \frac{\alpha\rho c_p}{\lambda}V_1 + \rho c_p V(\frac{\beta_t}{V} - \frac{\rho}{\tau_2})X_2\right]$$

Avec : $Q = \rho.Cp\ (V_2 - X_2) + \lambda\ (V_3 - X_2)$.