



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Maintenance et Instrumentation

Spécialité : Mesure-Analyse-Qualité

Thème

Contrôle de température dans les procédés thermiques

Présenté et soutenu publiquement par :

AMEUR Bahia

ABBADI Aicha

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
ADEJLOUA Abdel Aziz	MAA	Univ. Oran 2-IMSI	Président
MEKKI Ibrahim El Khalil	MCB	Univ. Oran 2-IMSI	Encadreur
BENFEKIR Abderrahim	MCB	Univ. Oran 2-IMSI	Examineur

Juin 2017

Résumé :

La température peut être un élément analogique simple, mais elle est très difficile à contrôler puisque les processus industriels actuels sont complexes et exigent une optimisation permanente toujours plus poussée.

Afin de faire une étude comparative entre la commande floue et la commande proportionnelle intégrale, dérivée (PID). On a étudié en simulation avec MATLAB/SIMULINK le contrôle de température de deux procédés thermiques : le premier est une régulation de la température de l'eau dans un échangeur tubulaire coaxial et le deuxième est une régulation de la température d'une serre agricole.

Mots clés :

Echangeur de chaleur; Serre agricole; Régulateur PID; Régulateur flou; MATLAB/SIMULINK.

Abstract:

The temperature can be a simple analog element, yet it is difficult to control as the current industrial processes are complex and require further permanent optimization.

In order to do a comparative study between the fuzzy control and the classical PID control. We studied in simulation using MATLAB/SIMULINK the temperature control of two thermal systems: the first one is the control of water temperature in a double pipe heat exchanger and the second is the control of temperature of a green house..

Key words:

Heat exchanger; Green house; PID controller; Fuzzy controller; MATLAB/SIMULINK.

Remerciements

Avant tout nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage pour terminer ce modeste travail

A la suite, nous tenons à remercier vivement Monsieur MEKKI Ibrahim El Khalil notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations, ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier Messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance,

Nous remercions tous les professeurs de département de Maintenance en instrumentation et à tous ceux qui furent à un moment ou à un autre, partie prenante de ce travail.

Dédicaces

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à:

Nos chers parents, qui nous ont toujours soutenus dans nos études.

A tous nos frères et sœurs chacun par son nom.

A tous les membres nos familles.

A tous nos enseignants.

A tous nos amis.

A toutes les personnes qui nous ont aidées.

Nomenclature

\dot{w} : Taux de mass de liquide entrant et sortant les tubes kg/sec

\dot{q} : Taux de transfert de chaleur au liquide dans les tubes, kW

w : mass de liquide dans les tubes = $(\rho L v l)$ kg

UA : produit des coefficients d'échange de chaleur globale et la surface de tube, kW/K

TS : température de liquide dans le tube extérieur, °C

Ti : température de liquide entrant et sortant les tubes , °C

Cp : la chaleur spécifique de liquide à pression constant , kJ/kg-K

$C(s), G(s)$: fonction de transfert

τ_1 et τ_2 : la constante de temps du système SOPTD

U_s : Sortie de système

U_e, U : entré de système

$\varepsilon(t)$: erreur de système

K_p : Gain proportionnel

K_i : Gain intégral

K_d : Gain dérivé

T_i : Constante de temps d'intégration

T_d : Constante de temps de dérivation

T_n : Dosage de corrélation d'intégrale

μ : Fonction d'appartenance

TABLE DE MATIERE	i
LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES	iv
INTRODUCTION GENERALE	2

CHAPITRE I : ECHANGEUR DE CHALEUR

I.1. Introduction	04
I.2. Définition	04
I.3. Principe de fonctionnement	05
I.4. Configurations géométriques	06
I.4.1. Echangeurs tubulaires	06
I.4.1.1. Echangeur monotube	06
I.4.1.2. Echangeur coaxial	06
I.4.1.3. Echangeurs multitubulaires	07
I.4.1.4. Performance de l'échangeur tubulaire	09
I.4.1.5. Avantages de l'échangeur tubulaire	09
I.4.1.6. Inconvénients de l'échangeur tubulaire	09
I.4.1.7. Applications de l'échangeur tubulaire	09
I.4.2. Echangeur à plaques	09
I.4.2.1. Performance de l'échangeur à plaques	10
I.4.2.2. Avantages de l'échangeur à plaques	10
I.4.2.3. Inconvénients de l'échangeur à plaques	10
I.4.2.4. Applications de l'échangeur à plaques	10
I.5. Le Modèle choisi	11
I.6. Modélisation d'un échangeur de chaleur	12
I.7. Hypothèses	13
I.8. Sources de perturbations	14
I.9. Modèle mathématique de l'échangeur	14
I.10. Conclusion	15

CHAPITRE II : SERRE AGRICOLE

II.1. Introduction	17
II.2. Définition	17
II.3. Généralités sur la serre agricole	17
II.4. Revêtement de la serre	18
II.4.1. Verre	18
II.4.2. Polyéthylène	18
II.5. Aspects techniques	19
II.5.1. Plantes en pot	19
II.5.2. Fleurs coupées et le maraichage	20
II.5.3. Jeunes plants	20
II.5.4. Combinaison de différentes options techniques	21
II.6. Effets de serre	22
II.7. Avantages et inconvénients de la production sous serre	22
II.7.1. Avantages	22
II.7.2. Inconvénients	22
II.8. Contrôle de température sous serre	22
II.9. Equipements de régulation	23
II.9.1. Capteur de température	23
II.9.2. Chauffage	23
II.9.2.1. Chauffage électrique	23

II.9.2.2. Chauffage à pétrole	23
II.9.2.3. Radiateur à gaz	23
II.9.3. Ventilation	24
II.9.3.1. Ventilation naturelle	24
II.9.3.2. Ventilation forcée	24
II.9.4. Choix des consignes pour la régulation	24
II.10. Conclusion	25

CHAPITRE III : REGULATEUR PID

III.1. Introduction	27
III.2. Schéma fonctionnel d'une boucle de régulation	27
III.3. Action de régler	27
III.4. Fonction de transfert	28
III.5. régulateurs de Base	28
III.5.1. Régulateur à action proportionnelle (P).....	28
III.5.1.1 Principe	28
III.5.1.2. Schéma fonctionnel	29
III.5.1.3. Fonction de transfert	29
III.5.1.4. Réponse indicielle	29
III.5.1.5. Effet de l'action proportionnelle	29
III.5.2. Régulateur à action intégrale (I)	30
III.5.2.1. Principe	30
III.5.2.2. Schéma fonctionnel	30
III.5.2.3. Fonction de transfert	30
III.5.2.4. Réponse indicielle	30
III.5.2.5. Effet de l'action intégrale	31
III.5.3. Régulateur à action proportionnelle et intégrale (PI)	31
III.5.3.1. Principe	31
III.5.3.2. Schéma fonctionnel	31
III.5.3.3. Fonction de transfert	31
III.5.3.4. Réponse indicielle	32
III.5.3.5. Effet de l'action proportionnelle et intégrale	32
III.5.4. Régulateur à action dérivée (D)	32
III.5.4.1. Principe	32
III.5.4.2. Schéma fonctionnel	32
III.5.4.3. Fonction de transfert	32
III.5.4.4. Réponse indicielle	33
III.5.4.5. Effet de l'action dérivée	33
III.5.5. Régulateur à actions proportionnelle et dérivée (PD)	33
III.5.5.1. Principe	33
III.5.5.2. Schéma fonctionnel	33
III.5.5.3. Fonction de transfert	34
III.5.5.4. Réponse indicielle	34
III.5.5.5. Effet de l'action proportionnelle dérivée	34
III.5.6. Régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID)	34
III.5.6.1. Définition PID	34
III.5.6.2. Principe	34
III.5.6.3. Schéma fonctionnel	35
III.5.6.4. Fonction de transfert	35
III.5.6.5. Réponse indicielle	35
III.5.6.6. Effet de l'action proportionnelle, intégrale et dérivée	35

III.5.6.7. Variation des paramètres de PID	36
III.5.6.8. PID avantages et inconvénients	37
III.6. Cahier de charge	38
III.6.1. Robustesse	38
III.6.2. Rapidité	38
III.6.3. Critère de précision	38
III.7. Conclusion	38

CHAPITRE IV : REGULATEUR FLOU

IV.1. Introduction	40
IV.2. Logique classique et logique floue	40
IV.3. Ensembles flous	41
IV.4. Opérateurs flous	42
IV.5. Règles floues	43
IV.6. Réglage par logique floue	44
IV.7. Configuration interne d'un régulateur à logique floue	44
IV.7.1. Fuzzification	44
IV.7.2. Inférence floue	45
IV.7.2.1. Inférence Mamdani	45
IV.7.2.2. Inférence Sugeno	46
IV.7.3. Défuzzification	46
IV.7.4. Base de connaissance	47
IV.8. Avantages et inconvénients de réglage par logique floue	47
IV.8.1. Les avantages	47
IV.8.2. Les inconvénients	47
IV.9. Conclusion	47

CHAPITRE V : RESULTATS DE SIMULATIONS

V.1. Introduction	49
V.2. Résultats de simulations	49
V.2.1. Simulation de la serre agricole	49
V.2.1.1. Régulation de température de la serre avec régulateur PID sans perturbation	49
V.2.1.2. Paramètres du système simulé	49
V.2.1.3. Régulation de température de la serre avec régulateur PID avec perturbation	50
V.2.1.4. Régulation de la serre avec régulateur flou	54
V.2.2. Simulation de l'échangeur	54
V.2.2.1. Régulateur PID	54
V.2.2.2. Simulation de l'échangeur de chaleur avec un régulateur PID optimisé ..	54
V.3. Conclusion	55
CONCLUSION GENERALE	57
BIBLIOGRAPHIE	59

Liste des tableaux

Tableau III.1	Effets des régulateurs P, I et D sur les régimes statique et dynamique du système en boucle fermée	35
Tableau III.2	Résumé des effets respectifs des actions P, I et D	37
Tableau V.1	Paramètres de simulation de la serre agricole	49
Tableau V.2	Comparaison des paramètres.	53

Liste des figures

Figure I.1	: Echangeur à tube et calandre	05
Figure I.2	: Echangeur monotube	06
Figure I.3	: Echangeur coaxial	06
Figure I.4	: Echangeur de chaleur à co-courant	07
Figure I.5	: Echangeur de chaleur à contre courant	07
Figure I.6	: Echangeur à tube séparé.....	07
Figure I.7	: Principe d'un échangeur de chaleur tube et calandre	08
Figure I.8	: Schéma d'un échangeur 1-2	08
Figure I.9	: Schéma d'un échangeur 2-4	08
Figure I.10	: Echangeur à plaques	09
Figure I.11	: Classification des échangeurs de chaleur.....	11
Figure I.12	: Principe d'un échangeur de chaleur	11
Figure I.13	: Schéma de contrôle d'un échangeur de chaleur	12
Figure I.14	: Sous-système : taux d'échange de chaleur	13
Figure I.15	: Sous-système : bilan d'énergie de chaleur	13
Figure I.16	: Model Simulink d'un échangeur de chaleur	13
Figure II.1	: Structure d'une serre agricole à deux chapèles	17
Figure II.2	: Serre agricole en verre	18
Figure II.3	: Serre agricole en polyéthylène	19
Figure II.4	: Chauffage des plates en pots	19
Figure II.5	: Chauffage des fleurs coupées et le maraichage	20
Figure II.6	: Chauffage des jeunes plants	21
Figure II.7	: Production de tomates biologiques sous serre	21
Figure II.8	: Commande d'un procédé par ordinateur numérique	22
Figure II.9	: Choix des consignes de la serre	25
Figure III.1	: Schéma générale d'un système de régulation	28
Figure III.2	: Schéma fonctionnelle d'un régulateur	28
Figure III.3	: Schéma fonctionnelle d'un régulateur p	29
Figure III.4	: Réponse indicielle de régulateur p	29
Figure III.5	: Schéma fonctionnelle d'un régulateur I	30
Figure III.6	: Réponse indicielle de régulateur I	30
Figure III.7	: Schéma fonctionnelle d'un régulateur PI	31
Figure III.8	: Réponse indicielle de régulateur PI	32
Figure III.9	: Schéma fonctionnelle d'un régulateur D.....	32
Figure III.10	: Réponse indicielle de régulateur D	33
Figure III.11	: Schéma fonctionnelle d'un régulateur PD	33
Figure III.12	: Réponse indicielle de régulateur PD	34
Figure III.13	: Schéma fonctionnelle d'un régulateur PID	35

Figure III.14 : Réponse indicielle de régulateur PID	35
Figure III.15 : Réponse indicielle	36
Figure III.16 : Réponse indicielle	36
Figure III.17 : Réponse indicielle	36
Figure IV.1 : Classification des températures d'une pièce en deux ensembles	41
Figure IV.2 : Ensembles flous	42
Figure IV.3 : Exemples des opérations sur les ensembles flous	43
Figure IV.4 : Règles floues	43
Figure IV.5 : Structure d'un réglage par logique floue	44
Figure IV.6 : Structure interne d'un régulateur flou	44
Figure IV.7 : Ensembles flous pour exemples d'inférence mamdani	46
Figure V.1 : Schéma Simulink d'une serre avec un régulateur PID	49
Figure V.2 : Réponse du système avec un régulateur PD	50
Figure V.3 : Réponse du système avec un régulateur PID en présence d'une perturbation.	50
Figure V.4 : Régulation avec un correcteur flou	51
Figure V.5 : Fuzzification des variables d'entrée (l'erreur)	51
Figure V.6 : Fuzzification des variables de sortie (la commande)	52
Figure V.7 : Règles flous	53
Figure V.8 : Régulation de la température de la serre avec un régulateur flou.	53
Figure V.9 : Schéma blocs de contrôle d'un échangeur de chaleur (boucle fermée)	54
Figure V.10 : Schéma Simulink d'un échangeur de chaleur avec un régulateur PID optimisé	54
Figure V.11 : Réponse indicielle de l'échangeur de chaleur avec PID optimisé	55

INTRODUCTION GENERALE

La température peut être un élément analogique simple, mais elle est très difficile à contrôler tant les processus industriels actuels sont complexes et exigent une optimisation permanente toujours plus poussée.

Dans le présent travail, on va étudier en simulation le contrôle de température de deux procédés thermiques : le premier est une régulation de la température de l'eau dans un échangeur tubulaire coaxial et le deuxième est une régulation de la température d'une serre agricole. Une étude comparative entre la commande floue et la commande proportionnelle, intégrale, dérivée (PID) sera effectuée.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres. Après cette introduction générale, dans le premier chapitre on a mentionné les différents types des échangeurs de chaleur selon leur construction et on a choisis l'échangeur tubulaire coaxial comme un modèle pour la modélisation grâce à sa simplicité.

Le deuxième chapitre présente une étude générale de la serre, et l'étude de différents outils essentiels de la commande de température sous serre pour le développement de la plante et les composants importants pour la gestion de ces paramètres climatiques.

Le troisième chapitre porte une généralité sur les régulateurs de base et leurs actions et une étude sur le régulateur proportionnel intégral dérivée ensuite, les méthodes nécessaires pour choisir un bon régulateur.

Le quatrième chapitre présente une méthode moderne de contrôle qui est la logique floue et sa comparaison avec la logique classique (la logique booléenne) avec une explication générale de son principe de fonctionnement.

Dans le cinquième chapitre, on va simuler les deux systèmes choisis (échangeur tubulaire coaxial, serre agricole) avec le régulateur PID et le régulateur flou et on va comparer les résultats de simulation en utilisant MATLAB/SIMULINK.

La dernière partie de ce mémoire englobe une conclusion générale du travail.

CHAPITRE I
ECHANGEUR DE CHALEUR

I.1.Introduction :

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur. On estime à 90% la part des transferts d'énergie réalisée par les échangeurs de chaleur dans l'industrie.

L'échangeur de chaleur est un appareil thermique de grande importance dans les installations thermiques et énergétique. On rencontre au moins un échangeur de chaleur dans une installation thermique.

L'échangeur consiste essentiellement à transmettre la chaleur d'une source chaude à une autre source de plus faible température. Il est caractérisé par une grande diversité géométrique.

La transmission de chaleur dans ces appareils est réalisée par l'échange de chaleur entre le fluide primaire (le plus chaud) et la paroi séparatrice par convection de chaleur, l'échange de chaleur par conduction thermique dans la paroi et l'échange de chaleur entre la paroi séparatrice et le fluide secondaire par convection de chaleur à la différence des autres appareils thermiques, l'échangeur de chaleur ne contient aucune pièce mécanique mobile.

Dans un échangeur, la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Le même fluide peut conserver son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases (cas des condenseurs et des évaporateurs). [BEN08]

I.2.Définition :

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échanger la chaleur entre deux fluides sans se mélanger. Dans un échangeur thermique, le fluide chaud et le fluide froid sont séparés par une paroi (plane ou tubulaire).

La transmission de la chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid.

Les fluides, chauffant et chauffé sont des fluides caloporteurs.

Le fluide caloporteur est un fluide à l'état liquide qui est utilisé sans changement de phase pour le transfert d'un lieu à un autre une certaine quantité de chaleur générée par des moyens étranges. [BEN08]

Remarque :

Etant donné que la majorité des échangeurs de chaleur utilisés sont à surface d'échange c.à.d. les deux fluides sont séparés par une paroi, ces deux fluides peuvent être soit deux liquides, soit deux gaz ou vapeurs, soit un liquide et un gaz en outre, l'échange de chaleur dans l'appareil est effectué soit sans changement d'état (l'appareil est alors un simple échangeur), soit avec changement d'état (l'appareil est alors selon le cas, un condenseur ou un

évaporateur ou un cristalliseur) aussi bouilleurs, en absence de la paroi séparatrice, il y a un mélange direct entre les deux fluides (échangeur mélangeur).

Un échangeur est rarement constitué d'un seul tube. En général, on a une multitude d'éléments (un ensemble de tubes ou de plaques, etc...) [BEN08]

I.3. Principe de fonctionnement :

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduites qui les mettent en contact thermique.

D'une manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid.

Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi d'où le nom de l'appareil. Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. On vient de le dire, la quantité de chaleur transférée dépend de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres ce qui rend une étude précise de ces appareils assez complexe.

Les flux de chaleurs transférées vont aussi dépendre :

- Des températures d'entrée.
- Des caractéristiques thermiques des fluides (chaleurs spécifiques, conductivité thermique).
- Des fluides.
- Des coefficients d'échange par convection. [MAT02]

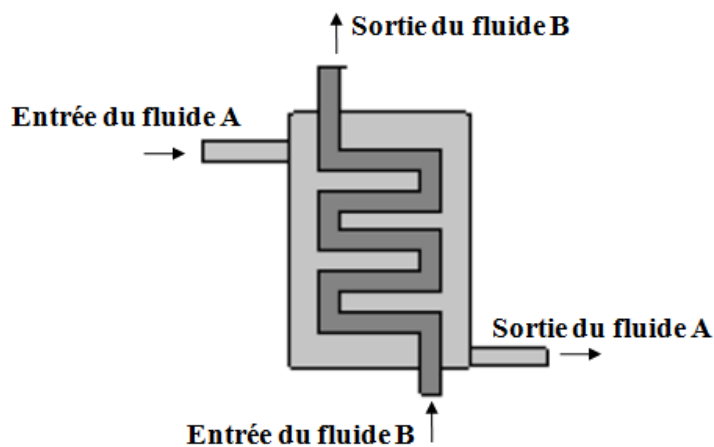


Figure I.1 : Echangeur à tube et calandre

I.4. Configurations géométriques :

Les principales configurations d'échangeurs selon leur construction sont présentées ci-dessous :

I.4.1. Echangeurs tubulaires :

Comme leur nom l'indique, Les échangeurs tubulaires sont constitués de tubes dont la paroi forme la surface d'échange. [BEN08]. On distingue 3 catégories :

I.4.1.1. Echangeur monotube :

Un tube ayant généralement la forme d'un serpentín est placé à l'intérieur d'un réservoir. [DOC03]



Figure I.2 : Echangeur monotube. [NEH11]

I.4.1.2. Echangeur coaxial (ou « tube-in-tube ») :

Deux tubes sont imbriqués l'un dans l'autre. En général, le fluide chaud ou à haute pression s'écoule dans le tube intérieur. [DOC03]

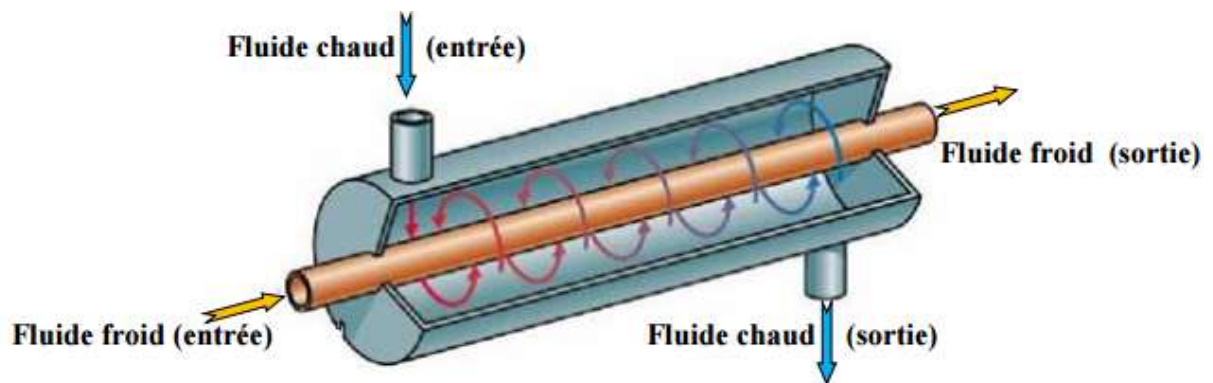


Figure I.3 : Echangeur coaxial. [MEB12]

Deux types de circulation sont possibles:

- Circulation à courants parallèles ou co-courant.
- Circulation à contre-courant. [LAK12]

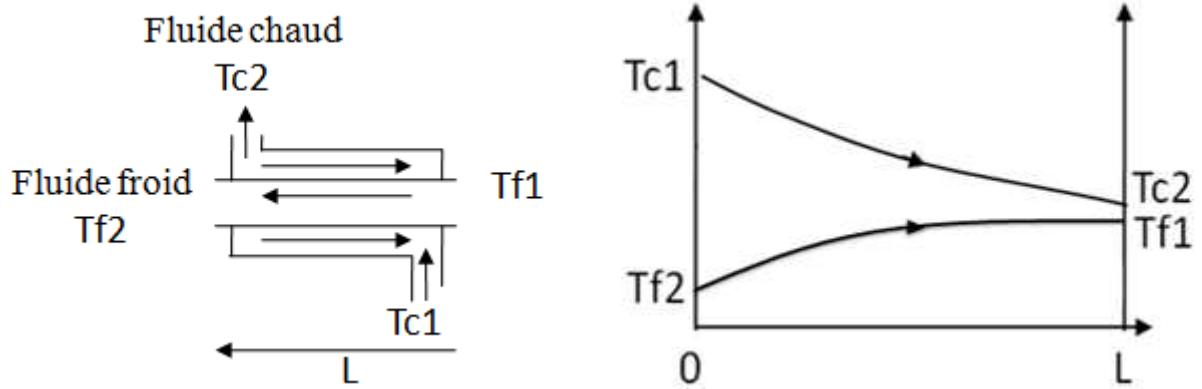


Figure I.4: Echangeur de chaleur à co-courant. [LAK12]

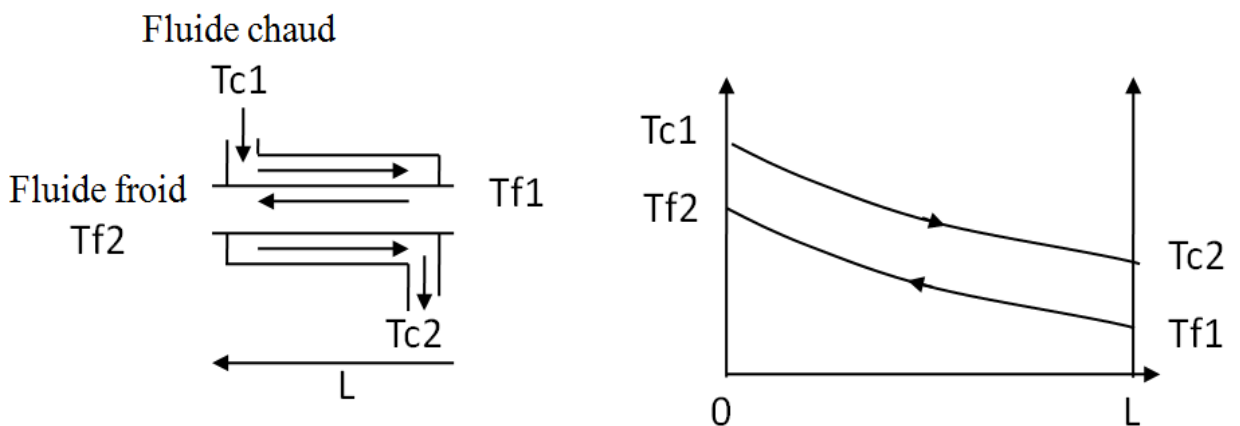


Figure I.5 : Echangeur de chaleur à contre-courant. [BEN08]

I.4.1.3. Echangeur multitubulaire :

Qui peut exister sous deux formes :

a. Echangeur à tubes séparés :

À l'intérieur d'un gros tube sont placés plusieurs petits tubes, maintenus écartés par des entretoises. [DOC03]

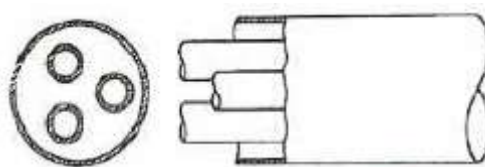


Figure I.6: Échangeur à tube séparé. [NEH11]

b. Echangeur à tubes et calandre :

Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans la calandre autour de tubes qui le franchissent tandis que l'autre fluide circule à l'intérieur des tubes. Souvent, il est constitué d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale. [MEB12]

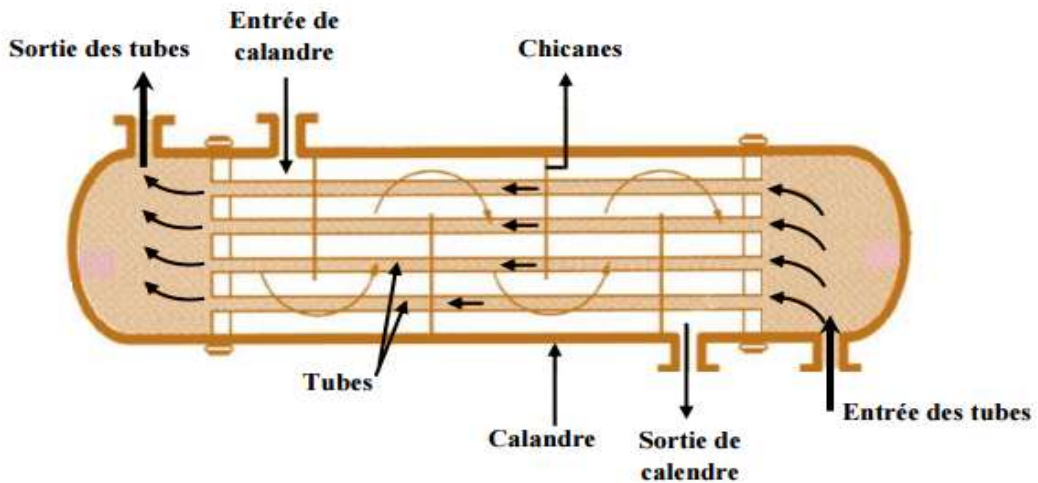


Figure I.7: Principe d'un échangeur de chaleur tubes et calandre. [MEB12]

Echangeur 1-2 :

C'est l'échangeur à faisceau le plus simple. Le fluide circulant dans l'enveloppe (calandre) effectue un seul passage tandis que le fluide circulant dans le tube effectue 2(ou 2n) passages : [LAK12]

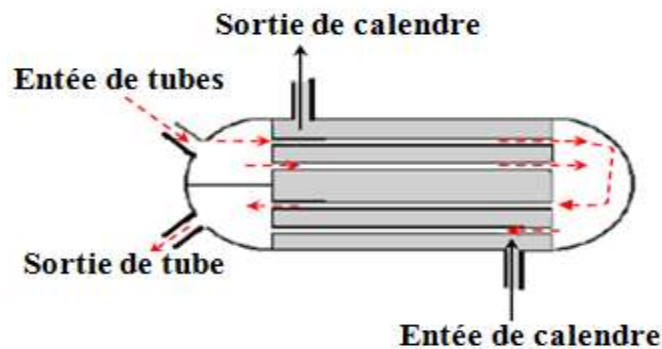


Figure I.8: Schéma d'un échangeur 1-2.

Echangeur 2-4 :

Lorsque l'échangeur 1-2 ne permet pas d'obtenir une efficacité supérieure à 0,75. On cherche à se rapprocher d'avantage de l'échangeur à contre-courant en effectuant 2 (ou plus) passages dans le côté calandre. L'échangeur 2-4 comporte une chicane longitudinale de sorte que le fluide en enveloppe effectue 2 passages. Le fluide dans le tube effectue 4 (ou 4n) passages. [LAK12]



Figure I.9 : Schéma d'un échangeur 2-4.

I.4.1.4. Performance de l'échangeur tubulaire :

- Divers matériaux de construction sont utilisés pour couvrir des gammes de température et de pression très étendues.
- Ces échangeurs sont utilisés dans des applications pouvant atteindre plusieurs MW.

I.4.1.5. Avantages de l'échangeur tubulaire :

- Équipement fiable et robuste.
- Résistance aux pressions élevées.
- Accepte de grands écarts de température.

I.4.1.6. Inconvénients de l'échangeur tubulaire :

- Moins performant que d'autres types d'échangeurs.
- Encombrement. [DOC03]

I.4.1.7. Applications de l'échangeur tubulaire :

- Applications gaz/gaz, liquide/liquide.
- Tous secteurs industriels. [DOC03]

I.4.2. Echangeurs à plaques :

Ce type d'échangeurs est constitué de plaques assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. Un jeu de joints assure la distribution des fluides entre les plaques de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter plaques successifs. [MEB12]

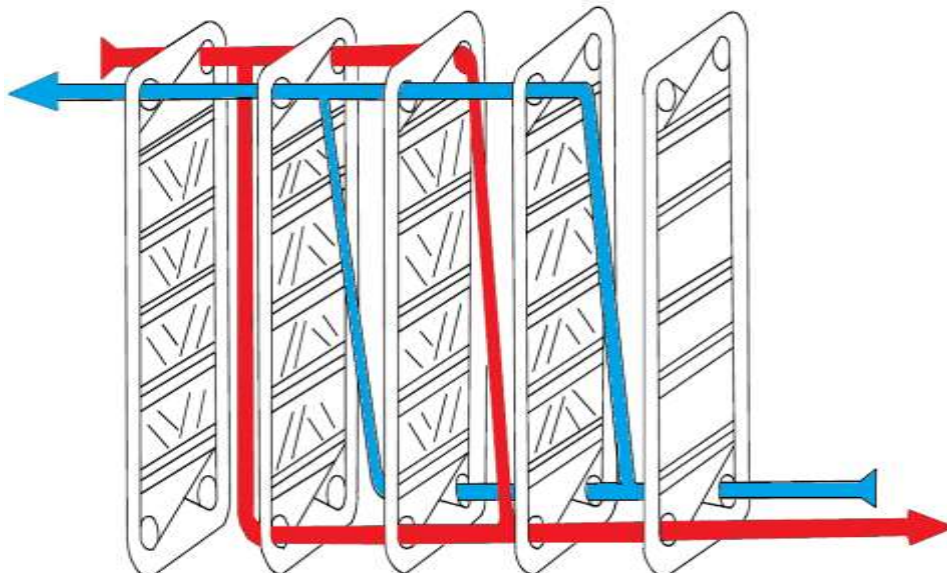


Figure I.10 : Echangeur à plaques. [DEL12]

Ainsi, on peut trouver d'autre classification de ce type d'échangeurs (compacts/à plaques) tels :

- Les échangeurs à plaques spirales.
- Les échangeurs à plaques circulaires.
- Les échangeurs à plaques soudées. [MEB12]

I.4.2.1. Performance de l'échangeur à plaques :

- Les échangeurs à plaques sont très utilisés pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique.
- la gamme de températures de fonctionnement est réduite par l'utilisation des joints en matières organiques.
- Son utilité apparait clairement lors des grandes puissances. [MEB12]

I.4.2.2. Avantages de l'échangeur à plaques :

- Simple et fiable.
- Grande durée de vie et pratiquement pas de panne.
- Absence de pièces en mouvement, sécurité de fonctionnement.
- Peu de maintenance nécessaire.
- Faible risque de contamination de l'air frais en cas de bonne conception. [DOC03]

I.4.2.3. Inconvénients de l'échangeur à plaques :

- Disposition Air neuf/Air rejeté proche.
- Sans by-pass, il n'y aura pas de régulation de température et cela conduit à un risque de surchauffer en été.
- L'échangeur présente une perte de charge relativement importante, surtout à de grands débits.
- En cas de panne des équipements mal conçus, ils peuvent être une source de bruit ainsi que de fuites et il y aura une contamination. [DOC03]

I.4.2.4. Applications de l'échangeur à plaques :

- Applications liquide/liquide, liquide/gaz.
- Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire, l'industrie nucléaire ou chimique.

Généralement, on trouve plusieurs classifications des échangeurs telles que celle présentée dans la figure I.11.

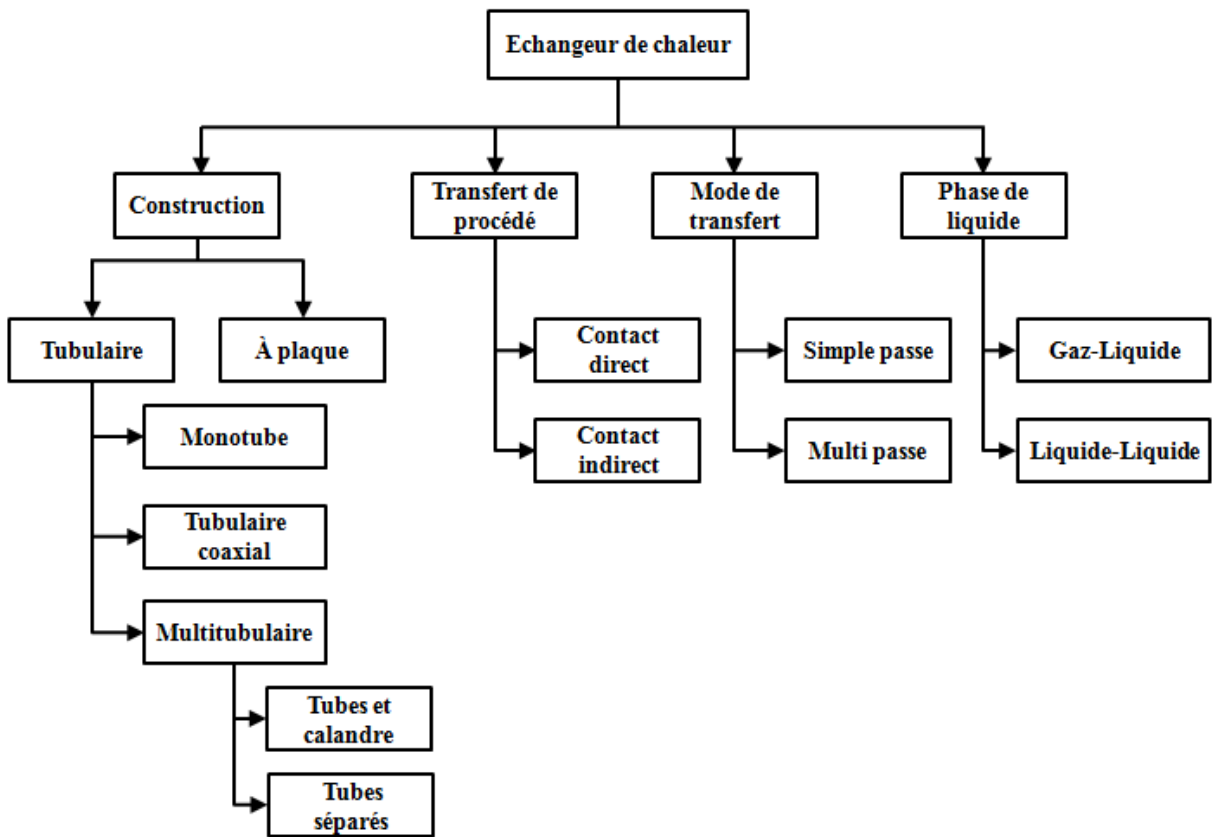


Figure I.11: Classification des échangeurs de chaleur.

I.5.Modèle choisi :

La dynamique d'échangeur de chaleur dépend de différents facteurs comme la différence de température et la surface d'échange de chaleur.

Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans des différentes industries (pétrolière, alimentaire, pétrochimique, nucléaire)

Le principe d'échangeur de chaleur est représenté dans la figure I.12. [PAD14]

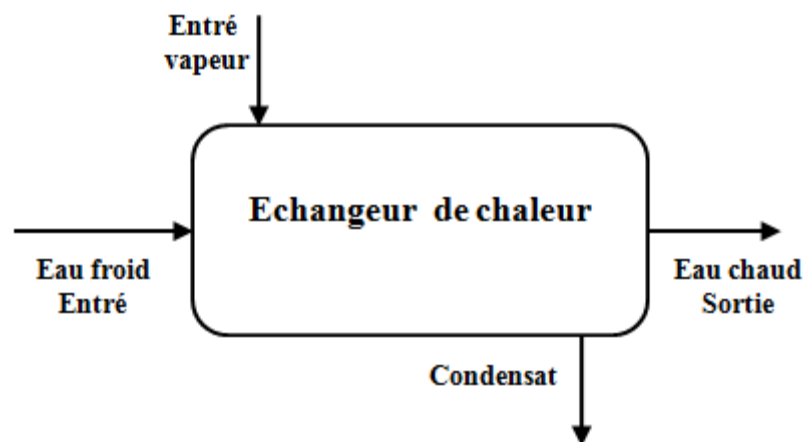


Figure I.12: Principe d'un échangeur de chaleur.

Il y a plusieurs types des échangeurs de chaleur.

L'échangeur de chaleur coaxial est le plus utilisé. Parce qu'il est facile à manifacter dans des tailles différentes, il fonctionne en haute pression et il est facile à démonter pour le maintien et nettoyer. [PAD14]

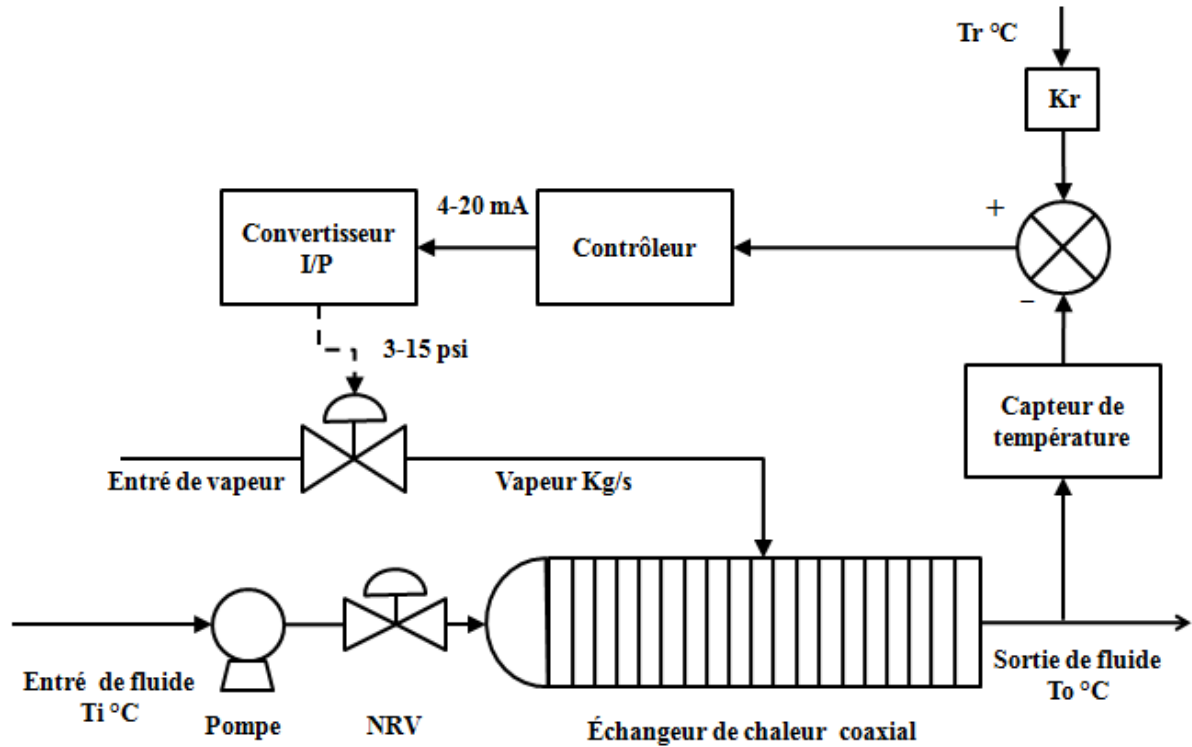


Figure I.13: Schéma de contrôle d'un échangeur de chaleur.

I.6.Modélisation d'un échangeur de chaleur:

Pour créer un modèle d'échangeur de chaleur on utilise les équations suivantes :

Taux d'échange de chaleur [MUK16]:

$$\dot{q} = UA(T_s - T_o) \tag{I.1}$$

Bilan d'énergie de chaleur :

$$w C_p \frac{dT_o}{dt} = \dot{w}C_p (T_i - T_o) + \dot{q} = \dot{w}C_p (T_i - T_o) + UA(T_s - T_o) \tag{I.2}$$

Avec :

\dot{w} : Taux de mass de liquide entrant et sortant les tubes kg/sec.

\dot{q} : Taux de transfert de chaleur au liquide dans les tubes, kW.

w : Mass de liquide dans les tubes = (ρLvl) kg.

UA : Produit des coefficients d'échange de chaleur globale et la surface de tube, kW/K.

T_s : Température de liquide dans le tube extérieur, °C.

T_i, T_o : Température de liquide entrant et sortant des tubes, °C.

C_p : La chaleur spécifique de liquide à pression constante, kJ/kg-K. [MUK16]

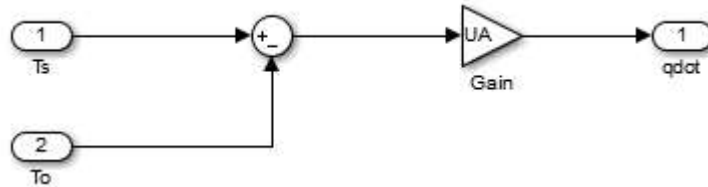


Figure I.14 : Sous-système : taux d'échange de chaleur.

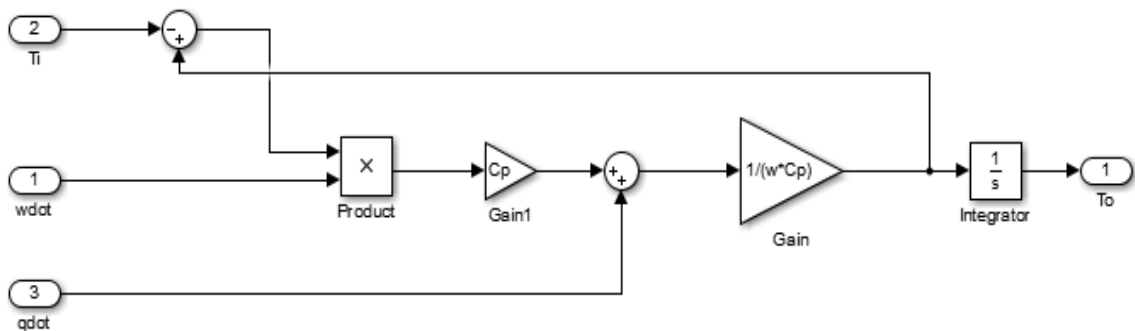


Figure I.15: Sous-système : bilan d'énergie de chaleur.

On utilisant les deux sous-systèmes, on crée un modèle SIMULINK d'un échangeur de chaleur

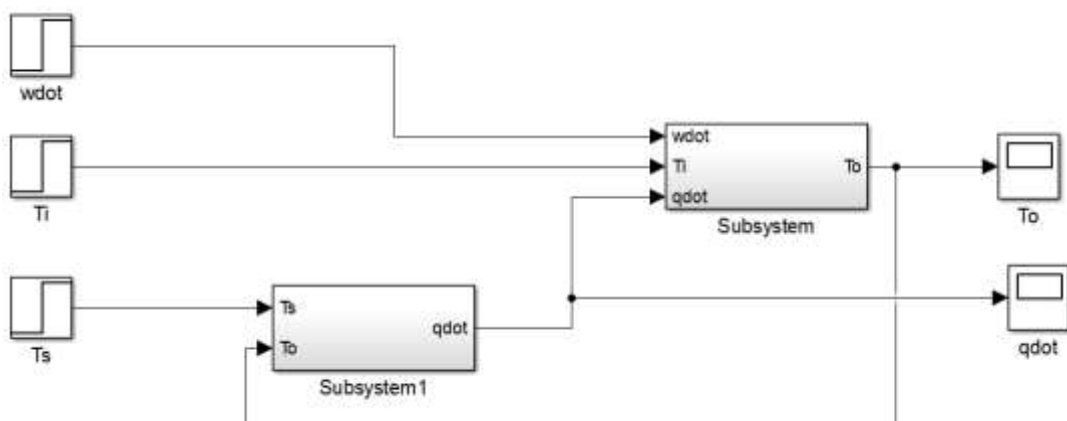


Figure I.16: Modèle SIMULINK d'un échangeur de chaleur.

I.7.Hypothèses :

Des différentes hypothèses sont considérées pour ce système

- Le taux de débit d'entrée et de débit de sortie sont équivalents, pour maintenir le niveau de liquide constant dans l'échangeur de chaleur.

- La capacité de stockage de chaleur de la paroi isolante est négligeable. [SRI14]

I.8.Sources de perturbations :

Il y a deux sources de perturbation dans ce système

- Variation de débit de fluide d'entrée.
- Variation de température de fluide d'entrée. [SRI14]

I.9. Modèle mathématique de l'échangeur :

Pour concevoir un contrôleur, un modèle mathématique approprié du processus doit être déterminé. La plupart des systèmes industriels sont de nature non linéaire et leur fonction de transfert peut être de premier ordre plus de délai (FOPTD) Ou de deuxième ordre plus de délai (SOPTD). [MUK16]

La forme générale du modèle FOPTD peut être exprimée comme

$$G(S) = \frac{Ke^{-\tau_D S}}{\tau_S + 1} \quad (\text{I.3})$$

La forme générale du modèle SOPTD peut être exprimée comme

$$G(S) = \frac{Ke^{-T_D S}}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 + 1)} \quad (\text{I.4})$$

Ici K est le gain de processus, D est le délai,

τ est la constante de temps du système FOPTD,

τ_1 et τ_2 sont la constante de temps du système SOPTD.

Les paramètres sont obtenus à partir d'une réponse en boucle ouverte.

Les délais sont mesurés à partir des données de réponse indicielle.

Le modèle de fonction de transfert du système d'échangeur de chaleur est :

$$G(s) = \frac{50}{30s+1} e^{-1s} \quad (\text{I.5})$$

Le modèle de fonction de transfert de la vanne est :

$$\frac{0.13}{3s+1} \quad (\text{I.6})$$

Le modèle de fonction de transfert du capteur est :

$$\frac{0.16}{10s+1} \quad (\text{I.7})$$

Le modèle de la fonction de transfert de perturbation est :

$$\frac{1}{10S+1} \quad (\text{I.8})$$

La fonction de transfert de processus est représentée comme

$$\frac{5e^{-1S}}{90S^2+33S+1} \quad (\text{I.5})$$

I.10.Conclusion

Vu l'importance industrielle des échangeurs de chaleur, il existe une diversité des différents types des échangeurs de chaleur qui ont de nombreuses applications dans les différents domaines.

On s'intéresse dans cette étude aux échangeurs tubulaires coaxiaux qui sont très utilisés dans le domaine industriel.

CHAPITRE II
SERRE AGRICOLE

II.1.Introduction :

La culture sous serre connaît depuis plusieurs années un développement important afin de faire face à un marché de plus en plus concurrentiel et conditionné par des normes de qualité sévères. [ELA14]

Les serres offrent la possibilité de maîtriser le climat (température, humidité et lumière) et de produire, au moment où ils le souhaitent, légumes, fruits, et plantes vertes. [AGR10]

Le contrôle climatique est l'un des éléments essentiels de la culture sous serre, c'est une manière de recréer un microclimat parfait en fonction des besoins de la plante peu importe le climat à l'extérieur.

La température est en général la variable la plus importante à contrôler du point de vue de la survie de la plante. En effet, elle est le paramètre le plus influant sur la photosynthèse qui est responsable de la croissance favorable de la serriculture. [ELA14]

Le but de ce chapitre est de donner un aperçu général sur la serre agricole et son bon déroulement du processus tel que le revêtement de la serre et les équipements de régulation (capteurs et actionneurs).

II.2.Définition :

Une serre est une structure qui peut être parfaitement close destinée en générale 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. [DJA15]

II.3.Généralités sur serre agricole :

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. [ELA14]

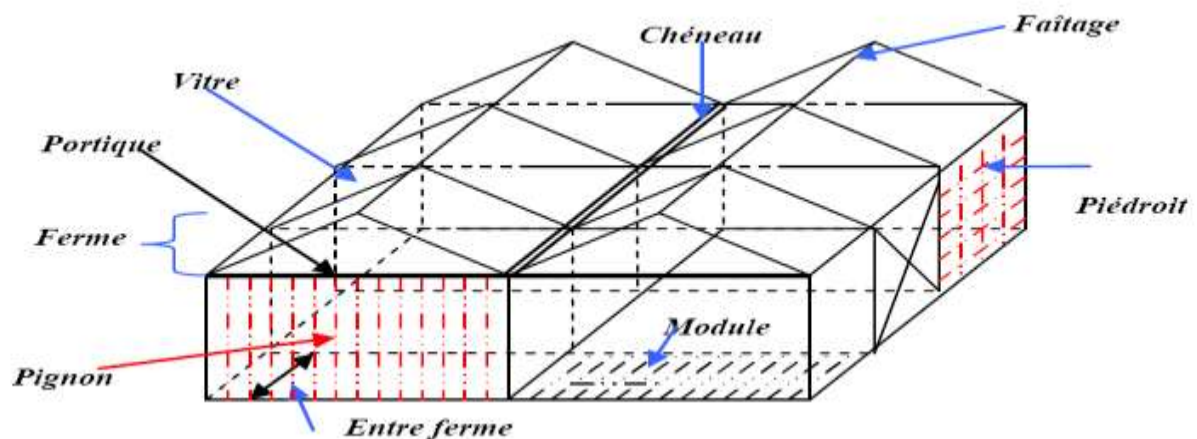


Figure II.1 : Structure d'une serre agricole à deux chapelles.

II.4.Revêtement de la serre :

Le choix de matériaux de revêtement de la serre constitue la partie la plus importante de tout le processus. C'est le principal élément responsable des pertes d'énergie à l'intérieur de la serre. Plusieurs matériaux de recouvrement sont disponibles. [ELA14]

II.4.1.Verre :

De point de vue de la transmission lumineuse, le verre est le meilleur matériau. Sa capacité de rétention du rayonnement infrarouge lui permet de provoquer au mieux l'effet de serre. Dû à leur poids élevé et à leur fragilité, les panneaux de verre ne sont produits qu'en dimensions réduites, ce qui a pour effet de nécessiter une structure importante et forte qui crée de l'ombrage.

L'emploi de verre à faible émissivité permet de réaliser des économies de 20% avec une réduction de la luminosité d'environ 10% alors que l'emploi de verre double (type "thermos") diminue les pertes de chaleur de 40%. Les coûts élevés d'investissement et de chauffage font de la serre de verre, un type peu adapté dans les régions méditerranéennes. [ELA14]



Figure II.2 : Serre agricole en verre.

I.4.2.Polyéthylène :

L'utilisation de film plastique a permis un grand développement des serres au cours de la dernière décennie. Le matériau le plus utilisé est le polyéthylène. Il est robuste, flexible et permet une structure légère. Sa transmission de la lumière est bonne et son action diffusante élimine les ombrages directs au sol causés par la structure. La pose facile d'un film de polyéthylène et son faible coût en font présentement le matériau le plus utilisé comme revêtement de serre.

L'utilisation d'une double paroi permet de réduire d'environ 40% la perte de chaleur par rapport à une paroi simple et d'éliminer considérablement la condensation à l'intérieur, phénomène rencontré en utilisant une simple paroi. [ELA14]



Figure II.3 : Serre agricole en Polyéthylène.

II.5.Aspects techniques :

A chaque type de production rencontré correspond une forme de chauffage localisé spécifique.

II.5.1.Plantes en pot :

Les plantes en pot (cyclamen, saintpaulia, poinsettia,...) sont cultivées sur des tables chauffantes. Ce sont des tables de culture équipées de tuyaux en matière plastique dans lesquels circule l'eau tiède. Ce type de culture nécessite un chauffage d'appoint généralement assuré par des thermosiphons (tubes aériens métalliques) ou des aérothermes (ventilateurs d'air chaud) alimentés en eau chaude (80°C). [AGR10]



Figure II.4 : Chauffage des plantes en pot.

Pour limiter les besoins en énergie, ces serres sont équipées d'écrans thermiques qui assurent aussi l'ombrage en période chaude.

II.5.2. Fleurs coupées et maraîchage :

Les productions horticoles commercialisées sous forme de fleurs coupées (chrysanthème, cyclamen, mufler, giroflées) ou les productions maraîchères (tomates, concombres) sont cultivées à même le sol, en pleine terre ou sur substrat artificiel (hydroponique). [AGR10]



Figure II.5: Chauffage des fleurs coupées et le maraîchage.

L'eau tiède circule dans des tubes en matière plastique posés au sol ou des tubes suspendus à hauteur de végétation.

Comme pour les plantes en pots, un chauffage d'appoint est nécessaire.

II.5.3. Jeunes plants :

Un troisième système est spécifique aux jeunes plants. Ceux-ci sont cultivés sur sol chauffé par tuyaux enterrés à faible profondeur.

Cette technique permet de ne pas encombrer la surface du sol afin d'avoir une densité de plants maximale. Elle est particulièrement adaptée aux semis et boutures puisqu'elle ne chauffe que la zone racinaire. [AGR10]



Figure II.6 : Chauffage des jeunes plantes.

II.5.4. Combinaison de différentes options techniques :

Les trois options techniques précédemment décrites peuvent être combinées pour tenir compte des contraintes de certaines régions de culture. Par exemple, la production de tomates biologiques sous serres doit impérativement se faire en pleine terre.

La combinaison du chauffage aérien et du chauffage du sol permet alors de maintenir des conditions optimales de production tout en respectant les critères stricts imposés à une production souhaitant bénéficier du label « biologique ». [AGR10]



Figure II.7: Production de tomates biologiques sous serre.

II.6.Effet de serre :

La couverture de la serre est transparente. Elle laisse bien passer la lumière, mais empêche que la chaleur qui se forme à l'intérieur, sous l'effet de la lumière du soleil, ne se dissipe trop vite vers l'extérieur grâce à la couverture de la serre.

L'effet de serre est donc le phénomène de réchauffement de la serre dû à la perméabilité de la couverture de cette dernière à certaines radiations solaires incidentes. [ELA14]

II.7.Avantages et inconvénients de la production sous serre :

II.7.1.Avantages :

La production sous serre permet de palier les problèmes rencontrés lors d'une culture en plein air :

- Les besoins des cultures sont limités dans le climat local.
- Les conditions climatiques externes entravent la production sous serre.

La serre permet de gérer aisément les facteurs climatiques ce qui n'est pas le cas pour une culture en plein air. Parmi les avantages majeurs d'une production sous serre, nous citons :

- Augmentation du rendement
- Une meilleure qualité des produits [DOC05]

II.7.2.Inconvénients :

- Le coût d'installation et d'entretien élevé
- Utilisation d'une haute technologie [DOC05]

II.8.Contrôle de température sous serre :

Le contrôle automatique d'une serre consiste à mettre en place une station d'acquisition et de contrôle. Cette dernière représente la plateforme de communication entre les paramètres à contrôler et le calculateur numérique (PC). La figure II.8 illustre le schéma synoptique global d'un système de contrôle et de supervision d'un procédé. Ce procédé est commandé par un calculateur numérique. [ELA14]

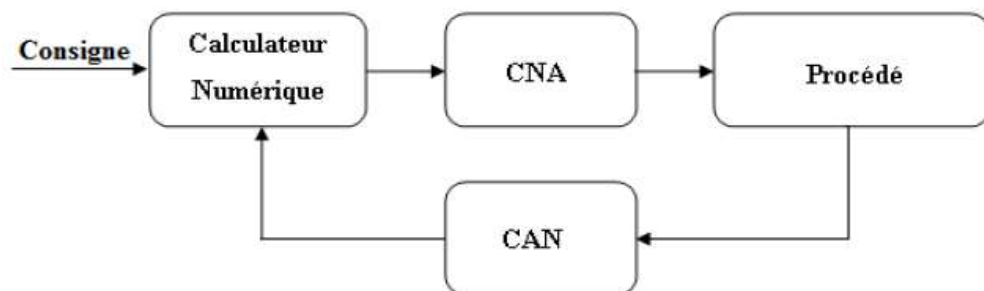


Figure II.8 : Commande d'un procédé par calculateur numérique.

II.9.Equipements de régulation :

Généralement, les paramètres climatiques sous serre restent encore éloignés des besoins des cultures. C'est pour cette raison que la plupart des serristes ont recours aux équipements permettant de gérer ces facteurs climatiques : chauffage, ventilation, brumisation et ouvrants qui agissent préférentiellement sur un facteur en modifiant les autres.

La température doit être réglée en fonction des besoins des cultures sous serre. [ELA14]

II.9.1.Capteur de température :

Sous serre la précision du capteur de température est un facteur supplémentaire à prendre en considération, du point de vue de l'efficacité énergétique. Les semi-conducteurs permettent de réaliser des thermomètres électroniques à bas coût dont la plage s'étend plus largement et avec une bonne précision. [ELA14]

II.9.2.Chauffage :

Le choix du chauffage se fera d'après la surface de la serre, en effet, on ne chauffe pas de la même manière une serre de 10 m² et une serre de 100 m². [DOC06]

Il y a 3 types de chauffages :

II.9.2.1.Chauffage électrique :

Le chauffage électrique de type radiateurs paraît être le plus adapté aux petites serres. Ces radiateurs sont pour la plupart soufflants, mais il existe un type de radiateur radiant à lampe infrarouge que l'on peut accrocher au plafond. Il est employé à chauffer en général des petites surfaces (- de 6 m²).

Attention cependant à n'utiliser que du matériel « spécial serre » qui sera isolé en cas de projection d'eau et dont les caractéristiques générales correspondent à ce type d'usage. [DOC06]

II.9.2.2.Chauffage à pétrole :

Communément utilisé en chauffage d'appoint pour les petites structures et les serres froides afin de les maintenir hors gel, ce type de chauffage est facile à installer, transportable et assez économique. Attention toutefois à employer uniquement du pétrole blanc sans soufre qui pourrait entraîner une concentration de gaz toxique pour les plantations. [DOC06]

II.9.2.3.Radiateur à gaz :

Il s'avère 30% plus économique que les chauffages à pétrole et certains modèles possèdent un thermostat réglable fort utile.

Très efficace pour une serre allant jusqu'à 15 m² ce type de chauffage ne nécessite pas d'installation électrique, branchez directement les connecteurs sur une bouteille de gaz. [DOC06]

II.9.3.Ventilation :

Le traitement de l'air a une fonction tout aussi importante que la lumière lorsque la culture est dans un espace clos. Un ventilateur permet de renouveler l'air et d'apporter aussi le CO₂ nécessaire à la photosynthèse tout en garantissant une régulation de la température et de l'hygrométrie. [ELA14]

Deux systèmes de ventilation peuvent être utilisés : La ventilation naturelle et la ventilation forcée.

II.9.3.1.Ventilation 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 environ 20% de la surface au sol et avoir un angle d'ouverture assez important pour permettre à l'air de bien circuler. [DOC04]

II.9.3.2.Ventilation forcée :

La ventilation forcée nécessitera une installation électrique spécifique dans la serre : boîtiers électriques avec protections des circuits, démarreurs, lignes, canaux électriques ... Par la suite vous pourrez installer votre ventilateur

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 ré équilibrage du climat général. [DOC04]

II.9.4.Choix des consignes pour la régulation :

Réguler le climat d'une serre ne consiste pas à suivre jour et nuit une valeur fixe et précise en température et en hygrométrie. Les besoins de la plante sont évolutifs tout au long de la journée, en particulier en fonction de l'ensoleillement.

D'une part, tout au long de son évolution les conditions favorables ne sont pas les mêmes. Il est difficile de savoir au degré près quels sont les besoins optimaux de la plante à chaque instant de son évolution. D'autre part.

La détermination de la consigne doit être un compromis qui permet de maximiser le bénéfice de production comme le montre la figure II.9. [ELA14]

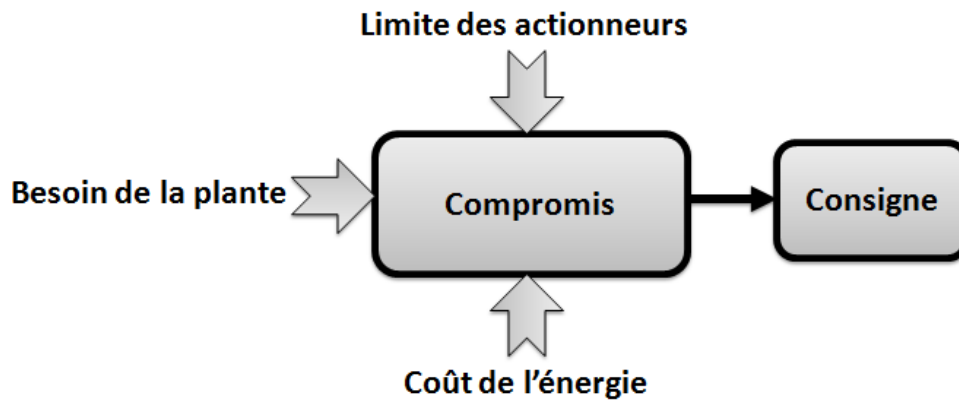


Figure II.9 : Choix des consignes de la serre.

II.10.Conclusion :

Le choix d'une structure de serre, des équipements et de la conduite climatique sont devenus le maillon clé de la qualité de la serriculture. Dans ce chapitre, nous avons défini les différents composants nécessaires à la gestion efficace des paramètres climatiques sous serre.

Ainsi, nous avons déterminé le paramètre climatique le plus agissant sur la croissance de la culture sous serre. Ensuite, nous avons étudié quelques outils essentiels et indispensables pour le bon fonctionnement du processus tel que le revêtement de la serre.

CHAPITRE III

REGULATEUR PID

III.1. Introduction

Tout système à régler possède un régulateur, qu'il soit analogique ou numérique. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux régulateurs. Ces régulateurs ont pour tâche de comparer, en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. En second lieu, le régulateur agit sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne. [COR09]

Les régulateurs PID répondent à plus du 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine pétrolière, par exemple, se compte par milliers. Malheureusement, malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies pour les paramètres P, I et D ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler. [MUD02]

III.2. Schéma fonctionnel d'une boucle de régulation :

Une boucle de régulation doit comporter au minimum les éléments suivants :

- Un capteur de mesure.
- Un transmetteur souvent intégré au capteur.
- Un régulateur.
- Un actionneur.

Elle est souvent complétée par :

- Un enregistreur.
- Des convertisseurs.
- Des sécurités.

Le régulateur reçoit deux informations :

- Le signal de mesure provenant du capteur.
- La consigne qui peut être locale ou externe.

En fonction de l'écart entre ces deux valeurs et de l'algorithme de calcul pour lequel il a été configuré, il délivre un signal de sortie (S ou OUT) dirigé vers l'actionneur afin d'annuler cette écart et de ramener la mesure vers la valeur de consigne. [MUD02]

III.3. Action de régler :

La plupart des systèmes comportent une réaction naturelle qui s'oppose à l'action et conduit à un nouvel état d'équilibre. Cet état n'est que rarement satisfaisant. On est donc amené à concevoir des ensembles, dans lesquels la grandeur désirée s'aligne rigoureusement sur une grandeur de consigne. [MUD02]

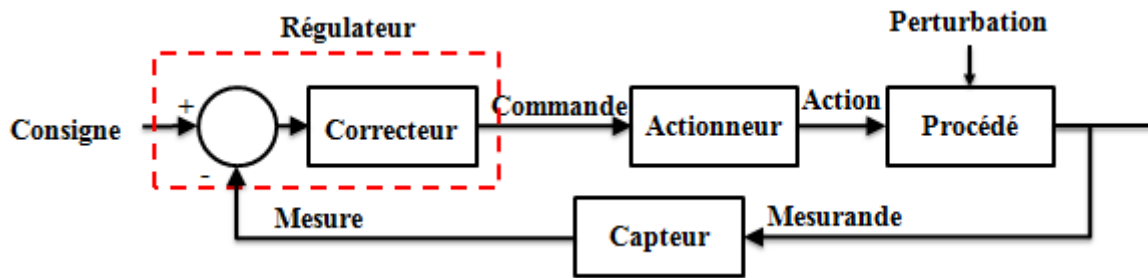


Figure III.1 : Schéma générale d'un système de régulation. [MUD02]

III.4. Fonction de transfert :

A l'aide de la fonction de transfert $G(s)$ d'un régulateur, on peut écrire la relation générale [COR09]

$$U_s(s) = G(s) \cdot U_e(s) \quad (\text{III.1})$$

Qui correspond au schéma bloc de la Figure III.2

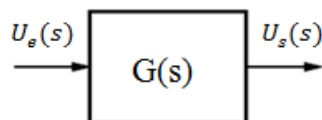


Figure III.2 : Schéma fonctionnel d'un régulateur. [COR09]

III.5. régulateurs de Base :

Un régulateur est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure.

Les régulateurs industriels les plus utilisés peuvent être classés, selon leurs actions de correction, de la manière suivante :

- Régulateur à action proportionnelle (P),
- Régulateur à action intégrale (I),
- Régulateur à actions proportionnelle et intégrale (PI),
- Régulateur à action dérivée (D),
- Régulateur à actions proportionnelle et dérivée (PD),
- Régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID). [BEK16]

III.5.1. Régulateur à action proportionnelle (P) :

III.5.1.1 Principe :

Le régulateur à action proportionnelle, est le régulateur le plus simple, puisqu'il est défini par un simple gain K .

La relation entre la sortie du régulateur (ou signal de commande) $u(t)$ et le signal d'entrée du régulateur (signal d'erreur) $\varepsilon(t)$ est : [BEK16]

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{III.2})$$

III.5.1.2. Schéma fonctionnel :

Quelque soit le mécanisme et la source d'énergie utilisée, le régulateur proportionnel est essentiellement un amplificateur à gain variable. Son schéma fonctionnel est celui de la figure III.3

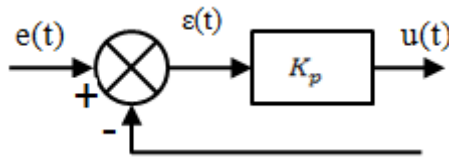


Figure III.3 : Schéma fonctionnel d'un régulateur P.

III.5.1.3. Fonction de transfert :

La fonction de transfert du régulateur P prend la forme générale suivante : [BEK16]

$$C(S) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \quad (\text{III.3})$$

Où :

K_p : gain proportionnel.

III.5.1.4. Réponse indicielle :



Figure III.4 : Réponse indicielle du régulateur P. [ETI14]

III.5.1.5. Effet de l'action proportionnelle :

L'action proportionnelle (P) crée un signal de commande $u(t)$ proportionnel au signal d'erreur $\varepsilon(t)$. Elle agit donc principalement sur le gain du système asservi et permet d'améliorer notablement la précision.

L'action proportionnelle entraîne une augmentation du gain, d'où une diminution de l'erreur statique (amélioration de la précision), mais augmente la bande passante du système, ce qui améliore la rapidité du système et, augmente l'instabilité du système.

Le régulateur proportionnel (P) n'est généralement pas utilisé seul. On verra que tout régulateur possède au moins l'action proportionnelle. [BEK16]

On constate que l'augmentation de K_p , entraîne :

- Une amélioration de l'erreur statique
- Une décroissance du temps de montée
- Une faible amélioration du temps d'établissement

Mais également une diminution de la marge de phase et une augmentation du dépassement (augmentation de l'instabilité du système). [BEK16]

III.5.2.Régulateur à action intégrale (I) :

III.5.2.1.Principe :

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$\frac{dU(t)}{dt} = K_i \cdot \varepsilon(t) \tag{III.4}$$

L'erreur est intégrée sur un intervalle de temps, puis multipliée par une constante K_i [BEK16]

$$u(t) = K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \tag{III.5}$$

III.5.2.2.Schéma fonctionnel :

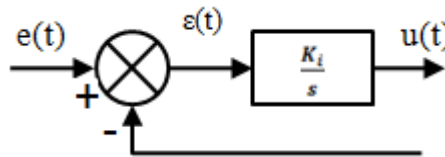


Figure III.5 : Schéma fonctionnel d'un régulateur I.

III.5.2.3.Fonction de transfert :

La fonction de transfert du régulateur I prend la forme générale suivante :

$$C(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{K_i}{s} = \frac{1}{T_i s} \tag{III.6}$$

Où : K_i : gain intégral.
 T_i : constante de temps d'intégration.

III.5.2.4.Réponse indicielle :

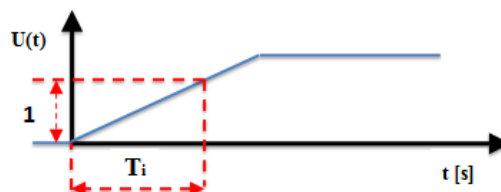


Figure III.6 : Réponse indicielle du régulateur I. [ETI14]

III.5.2.5. Effet de l'action intégrale:

L'intérêt principal de ce régulateur est d'ajouter dans la chaîne de commande une intégration. Nous savons que la présence d'une intégration dans la FTBO augmente la classe du système et réduit ou annule, selon le type d'entrée, l'erreur statique du système.

L'action intégrale pure :

- Améliore la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique
- Introduit un déphasage de -90° qui risque de déstabiliser le système (diminution de la marge de phase).

Le régulateur à action exclusivement Intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur et de son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au régulateur Proportionnel. [BEK16]

III.5.3. Régulateur à actions proportionnelle et intégrale (PI) :

III.5.3.1. Principe :

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est : [COR09]

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (\text{III.7})$$

III.5.3.2. Schéma fonctionnel :

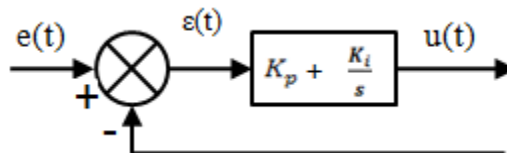


Figure III.7 : Schéma fonctionnel d'un régulateur PI.

III.5.3.3. Fonction de transfert :

La fonction de transfert du régulateur PI prend la forme générale suivante [COR09]

$$C(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s \cdot K_p} \right) = K_p \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_n} \right)$$

Où :

K_p : Gain proportionnel.

K_i : Gain intégral.

$T_i = \frac{1}{K_i}$: Constante de temps d'intégration.

$T_n = \frac{K_p}{K_i} = K_p \cdot T_i$: Dosage de corrélation d'intégrale.

III.5.3.4. Réponse indicielle :

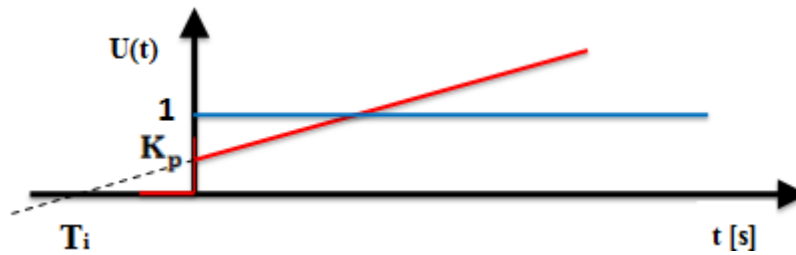


Figure III.8 : Réponse indicielle du régulateur PI. [ETI14]

III.5.3.5.Effet de l’action proportionnelle et intégrale:

La réponse indicielle montre qu’un régulateur PI assure une transmission instantanée du signal d’erreur ε , suivi d’une intégration de ce signal.

- Ce régulateur sera utilisé chaque fois qu’une erreur permanente doit être annulée ou minimisée, c’est à dire une amélioration de la précision du système.
- En effet, il introduit une augmentation du gain global du système aux basses fréquences.
- Par ailleurs, le régulateur PI a un effet déstabilisant en raison du pôle à l’origine. Mais, le zéro supplémentaire introduit tend à minimiser cette instabilité.
- K_p et K_i sont tous deux réglables. K_i ajuste l’action intégrale, tandis que K_p affecte à la fois les actions intégrale et proportionnelle. [BEK16]

III.5.4.Régulateur à action dérivée (D) :

III.5.4.1.Principe :

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d’erreur $\varepsilon(t)$ est : [BEK16]

$$u(t) = K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \tag{III.8}$$

III.5.4.2.Schéma fonctionnel :

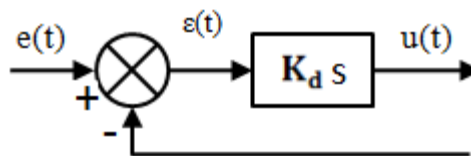


Figure III.9 : Schéma fonctionnel d’un régulateur D.

III.5.4.3.Fonction de transfert :

$$C(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_d \cdot s = T_d \cdot s \tag{III.9}$$

Où : K_d : Gain dérivé
 T_d : constante de temps de dérivation.

III.5.4.4. Réponse indicielle :

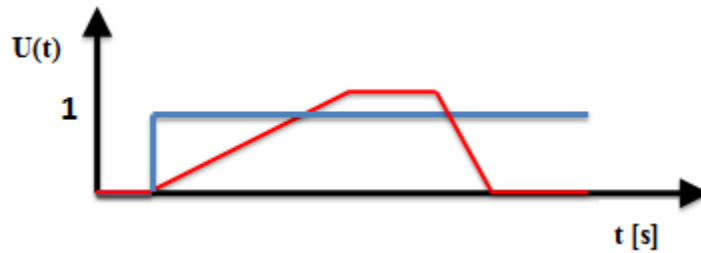


Figure III.10 : Réponse indicielle du régulateur D. [ETI14]

III.5.4.5. Effet de l'action dérivée:

La réponse indicielle montre qu'un régulateur à action exclusivement dérivée ne permet pas la transmission d'un signal. L'action dérivée ne peut donc être utilisée seule. On fait appel à elle lorsque le signal de commande u doit être particulièrement efficace. En effet, ce régulateur permet de faire intervenir la dérivée du signal d'erreur; il sera d'autant plus actif que la variation de $\varepsilon(t)$ est rapide. [BEK16]

L'action dérivée pure :

- Améliore la stabilité du système par l'introduction d'un déphasage supplémentaire de $+90^\circ$.
- Mais fait diminuer la précision du système.
- Et amplifie les bruits de hautes fréquences.

Le régulateur à action exclusivement dérivée n'est pratiquement jamais utilisé. Il est en général associé au correcteur Proportionnel. [BEK16]

III.5.5. Régulateur à actions proportionnelle et dérivée (PD) :

III.5.5.1. Principe :

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est : [BEK16]

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{III.10})$$

III.5.5.2. Schéma fonctionnel :

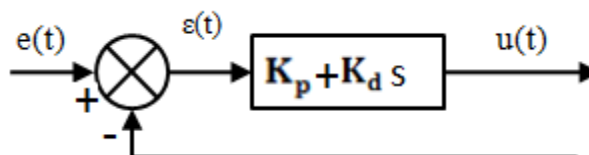


Figure III.11 : Schéma fonctionnel d'un régulateur PD.

III.5.5.3. Fonction de transfert :

Ce type de régulateur est utilisé pour augmenter la marge de phase. Pour des fréquences élevées, la partie dérivée pose un problème majeur de stabilité.

La fonction de transfert de ce type de régulateur est donnée par la relation : [COR09]

$$C(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + K_d s = K_p \left(1 + \frac{K_d}{K_p} s \right) = K_p (1 + T_d s) \quad (\text{III.11})$$

Où :

K_p : gain proportionnel.

K_d : gain dérivé,

T_d : constante de temps de dérivation.

III.5.5.4. Réponse indicielle :

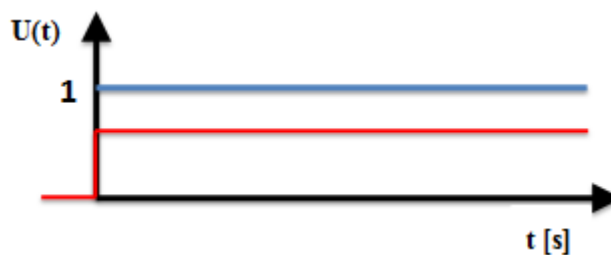


Figure III.12 : Réponse indicielle du régulateur PD. [ETI14]

III.5.5.5. Effet de l'action proportionnelle et dérivée:

- Amélioration de l'amortissement et réduction du dépassement.
- Réduction du temps de montée et du temps d'établissement (temps de réponse)
- Augmentation de la bande passante.
- Amélioration de la marge de phase et de la marge de gain.
- Possibilité d'accentuation des bruits aux hautes fréquences. [BEK16]

III.5.6. Régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée PID :

III.5.6.1. Définition PID : 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. [CAM10]

III.5.6.2. Principe :

Le régulateur PID combine les actions des 3 correcteurs P, I et D.

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est : [BEK16]

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{III.12})$$

III.5.6.3. Schéma fonctionnel :

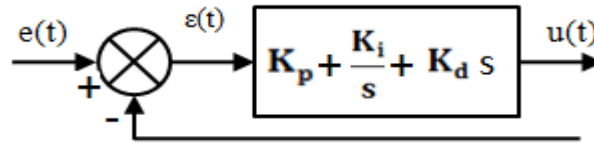


Figure III.13 : Schéma fonctionnel d'un régulateur PID. [BEK16]

III.5.6.4. Fonction de transfert :

$$C(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{K_d}{K_p} s + \frac{K_i}{K_p} \frac{1}{s} \right) = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{(III.13)}$$

Où :

K_p : Gain proportionnel.

K_i : Gain intégral.

K_d : Gain dérivé,

$T_d = \frac{K_d}{K_p}$: Constante de temps de dérivation.

$T_i = \frac{K_p}{K_i}$: Constante de temps d'intégration.

III.5.6.5. Réponse indicielle :

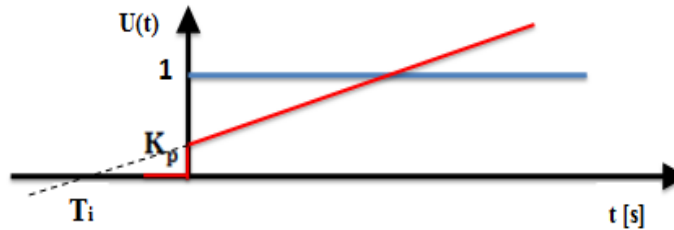


Figure III.14 : Réponse indicielle du régulateur PID. [ETI14]

III.5.6.6. Effet de l'action proportionnelle, intégrale et dérivée :

Les effets de chaque régulateur (K_p , K_i et K_d) sur la réponse en boucle fermée du système sont regroupés sur le tableau I.1 : [BEK16]

Tableau III.1 : Effets des régulateurs P, I, et D sur les régimes statique et dynamique du système en boucle fermée. [BEK16]

	Temps de montée	Dépassement	Temps d'établissement	Erreur statique
Si K_p croît	Diminue	Augmente	Peu de changements	Diminue
Si K_i croît	Diminue	Augmente	Augmente	Éliminée
Si K_d croît	Peu de changements	Diminue	Diminue	Peu de changements

Il est à noter que ces corrélations ne sont pas exactement précises, car K_p , K_i et K_d sont dépendants les uns des autres. En fait, le changement de l'une de ces variables peut modifier l'effet de l'autre.

III.5.6.7. Variation des paramètres de PID :

Plus K_p est grand, plus la réponse est rapide

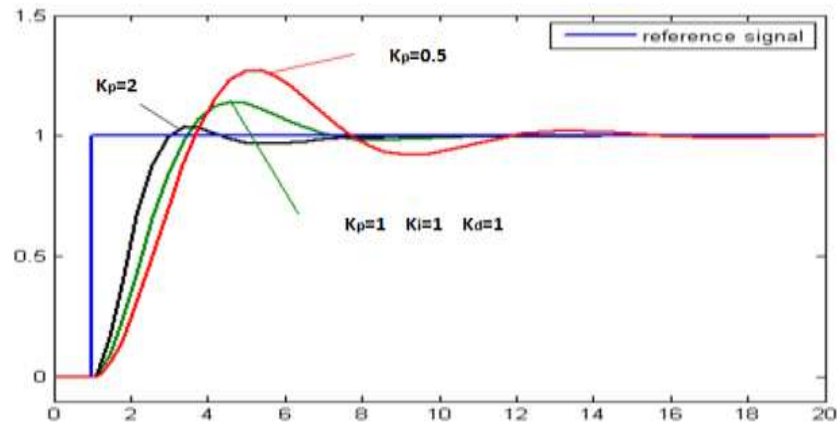


Figure III.15 : Réponse indicielle. [CAM10]

Plus K_i est élevé, plus l'erreur statique est corrigée

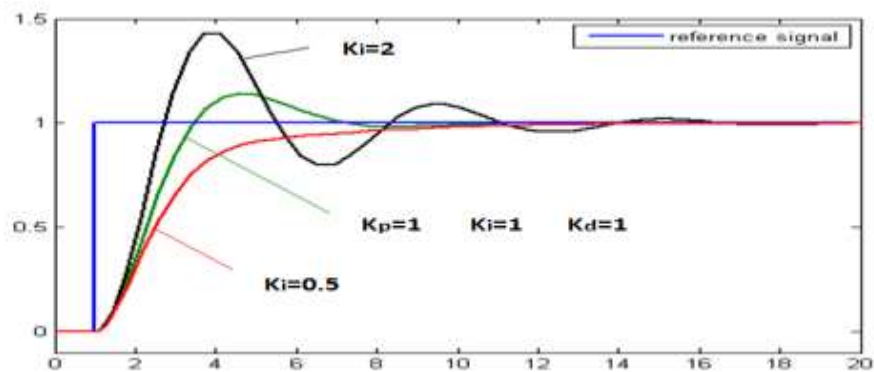


Figure III.16 : Réponse indicielle. [CAM10]

Réduit le dépassement et le temps de stabilisation, Sensible au bruit

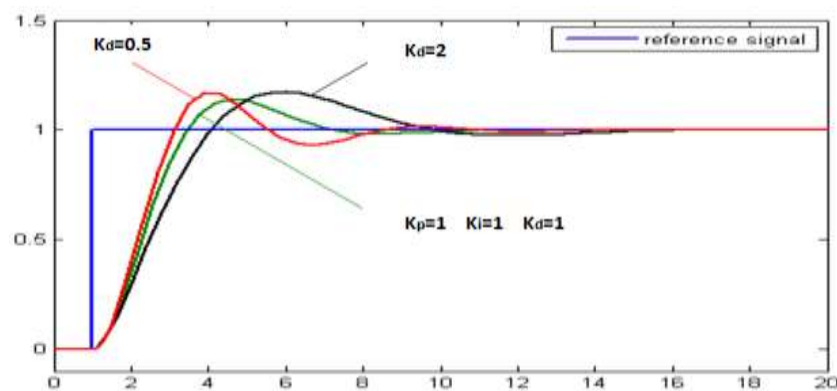


Figure III.17 : Réponse indicielle. [CAM10]

Dans le cas des systèmes simples, les paramètres du PID influencent la réponse du système de la manière suivante :

- GK_P : lorsque GK_P augmente, le temps de montée (Rise Time) est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.
- $\frac{1}{\tau_i}K_i$: lorsque $\frac{1}{\tau_i}K_i$ augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé, plus la réponse du système est ralentie.
- $\tau_d K_d$: lorsque $\tau_d K_d$ augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement au régime stationnaire est meilleur. Pas d'influences sur l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps il stabilise le système en le ralentissant trop mais dans un deuxième temps le régulateur anticipe trop et un système à temps mort élevé devient rapidement instable. [DOC01]

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les 3 effets (série, parallèle ou mixte).

III.5.6.8. PID avantages et inconvénients :

a. Avantages :

Matériel standardisé, conception et méthodes de calcul standard et simples, souvent empiriques. [ZAM09]

b. Inconvénients :

Il n'est jamais utilisable pour les systèmes fortement non linéaires ou pour les systèmes multi variables [ZAM09]

Tableau III.2 : Résumé des effets respectifs des actions P, I, et D. [ZAM09]

Action	Avantage	Désavantage
P	Dynamique	ne permet pas d'annuler une erreur statique
I	annulation d'erreur statique amélioration de la robustesse	action lente, ralentit le système (effet déstabilisant)
D	action très dynamique, améliore la rapidité (effet stabilisant)	sensibilité aux bruits, forte sollicitation de l'organe de commande

III.6. Cahier de charges :

Pour caractériser les performances d'un procédé en boucle fermée, on utilise trois paramètres :

- Robustesse
- Précision
- Rapidité

III.6.1. La robustesse :

La robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter à des usages non prévus/testés (dérive de production, vieillissement mécanique, environnements extrêmes...). [ALO06]

III.6.2. La rapidité :

Elle dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire.[ALO06]

III.6.3. Le critère de précision : est basé sur l'erreur statique.

L'analyse du système avec un PID est très simple mais sa conception peut être délicate, voire difficile, car il n'existe pas de méthode unique pour résoudre ce problème. Il faut trouver des compromis, le régulateur idéal n'existe pas. En général on se fixe un cahier des charges à respecter sur la robustesse, le dépassement et le temps d'établissement du régime stationnaire. [ALO06]

III.7. Conclusion :

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie, est le régulateur PID (proportionnel intégral dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres, les performances (amortissement, temps de réponse, ...) d'un processus modélisé par un deuxième ordre.

Le choix de régulateur reste la clé de réussite de la régulation industrielle, un bon réglage d'une boucle de régulation est celui qui répondra au meilleur compromis global du cahier des charges.

CHAPITRE IV
REGULATEUR FLOU

IV.1.Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de présenter les notions principales de théorie de la logique floue, ainsi que de la commande floue. D'abord, nous présentons quelques concepts de base de la logique floue ensuite le réglage par la commande floue ainsi que la configuration interne d'un régulateur à logique floue seront données.

Les avantages et les inconvénients seront donnés.

IV.2.Logique classique et logique floue :

La logique booléenne classique ne permet que deux états : VRAI ou FAUX. La logique floue permet d'exprimer différents niveaux, plutôt que seulement 1 ou 0. [GAB08]

Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proches du langage humain de tous les jours. De plus ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font références à une certaine connaissance du comportement du système.

Toute une série de notions fondamentales sont développées dans la logique floue.

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 logique floue. [BEK16]

Exemple :

La logique classique peut facilement partitionner la température d'une pièce en deux sous-ensembles, «moins de 15 degrés» et «15 degrés ou plus».

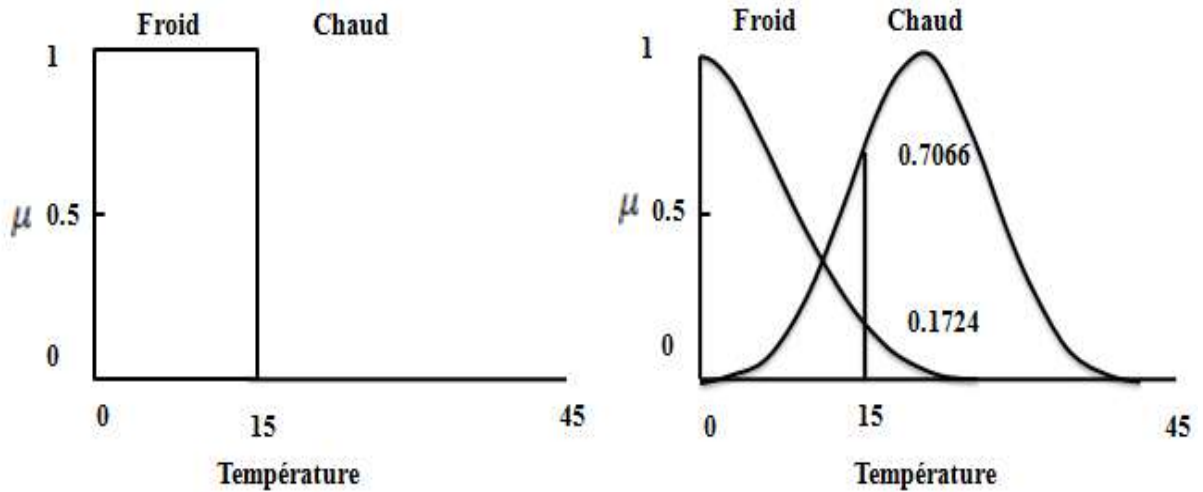
Toutes les températures de moins de 15 degrés sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur affecte une valeur de 1.

Toutes les températures atteignant 15 degrés ou plus ne sont pas considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur attribue une valeur de 0.

Cependant, le raisonnement humain s'appuie fréquemment sur des connaissances ou des données inexacts, incertaines ou imprécises.

Une personne placée dans une pièce dont la température est soit de 14.95 degrés soit de 15.05 degrés, ne fera certainement pas de distinction entre ces deux valeurs. Cette personne sera pourtant capable de dire si la pièce est «froide» ou «chaude», sans pour cela utiliser de température limite ni de mesure précise.

La figure suivante (IV.1) présente une comparaison de classification de température d'une pièce entre en deux ensemble entre la logique classique et la logique floue.



(a) Deux ensembles selon la logique classique

(b) Deux ensembles selon la logique floue

Figure IV.1: Classification des températures d'une pièce en deux ensembles.

La logique floue permet de définir des sous-ensembles, comme «froid» ou «chaud», en introduisant la possibilité pour une valeur d'appartenir plus ou moins à chacun de ces sous-ensembles. [GAB08]

IV.3.Ensembles floue :

En logique floue, un ensemble flou contient plusieurs valeurs. L'ensemble flou est concerné par un degré d'appartenance (ou degré de vérité).

On utilise un continuum de valeurs logiques entre 0 (complètement faux) et 1 (complètement vrai). Une fonction d'appartenance est utilisée pour mapper un item X dans le domaine des nombres réels à un intervalle de 0 à 1, ce qui permet un degré de vérité.

L'appartenance à un ensemble représente une valeur entre 0 et 1. Un ensemble flou peut être défini comme un ensemble ayant des frontières floues. Un ensemble flou est défini comme suit :

Soit S un ensemble et x un membre de cet ensemble. Un sous ensemble flou F de S est défini par une fonction d'appartenance $F(x)$ qui mesure le degré auquel x appartient à F . [GAB08]

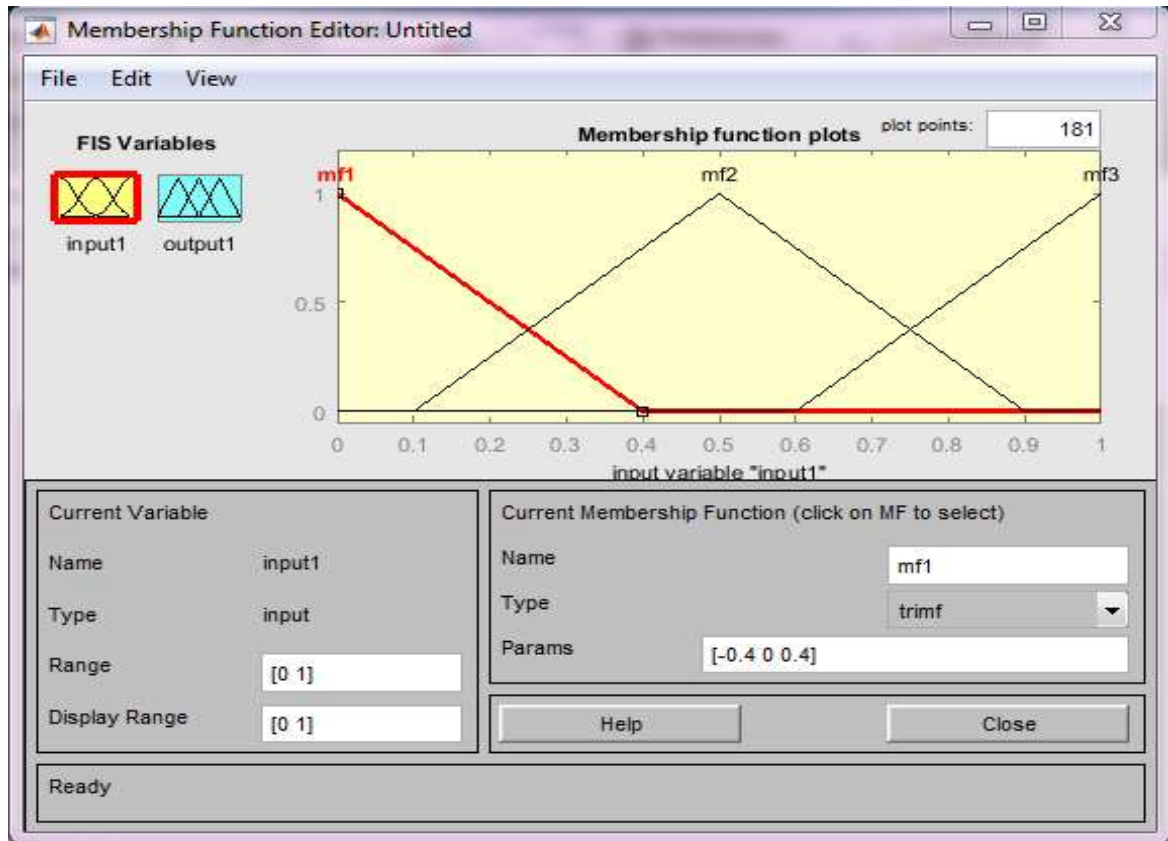


Figure IV.2 : Ensembles flous.

IV.4. Opérateur floue :

Les opérateurs flous décrivent comment des ensembles flous interagissent ensemble.

On regardera certaines opérations communes, comme le complément, l'intersection et l'union.

- Le complément permet de vérifier de combien un élément n'appartient pas à un ensemble. Comme exemple, si on a l'ensemble des températures élevées, le complément est l'ensemble des températures qui ne sont pas élevées. Si A est l'ensemble flou, son complément : A est :

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{IV.1})$$

- L'intersection de deux ensembles, en logique floue, est un peu différente des méthodes classiques. On cherche à savoir de combien un élément est-il dans les deux ensembles. On utilise alors la valeur minimale d'appartenance pour calculer l'intersection.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{IV.2})$$

- En logique floue, l'union est le contraire de l'intersection. On cherche à savoir de combien un est-il dans l'un des deux ensembles. On utilise la valeur maximale d'appartenance. [BEK16]

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{IV.3})$$

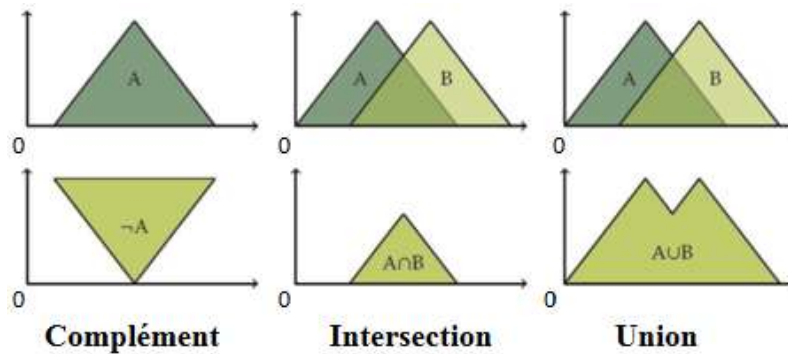


Figure VI.3 : Exemple d’opérations sur des ensembles flous.

IV.5.Règles floues :

Les règles floues permettent de déduire des connaissances concernant l’état du système en fonction des qualifications linguistiques fournies par l’étape de fuzzification. Ces connaissances sont également des qualifications linguistiques.

Habituellement, les règles floues sont déduites des expériences acquises par les opérateurs ou les experts. Ces connaissances sont traduites en règles simples pouvant être utilisées dans un processus d’inférence floue. Par exemple, si un expert exprime la règle «si la température de l’eau est chaude, il faut ajouter de l’eau froide», le système utilisera une règle du genre «si *p* alors *q*».

Il est cependant impossible de constituer une base de règles floues sans avoir besoin d’un expert humain. [BEK16]

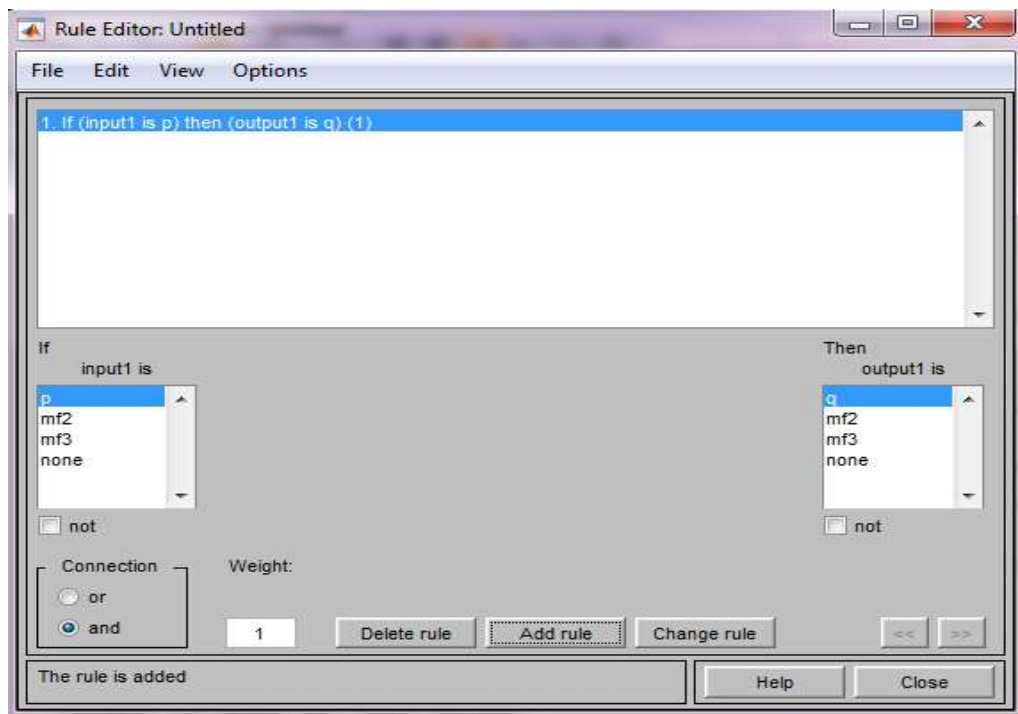


Figure VI.4 : Règles floues.

IV.6. Réglage par Logique Floue :

Le régulateur par logique floue a une structure identique à un système à réglage par feedback classique (ou réglage par contre-réaction). [BEK16]

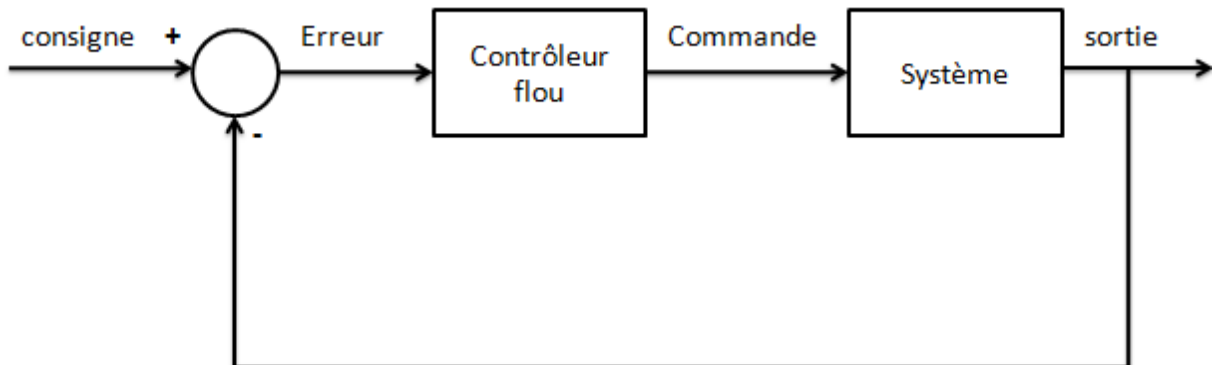


Figure IV.5 : Structure d'un réglage par logique floue.

IV.7. Configuration Interne d'un Régulateur à Logique Floue :

Quatre phases de traitement ont lieu dans un régulateur flou : fuzzification, inférence, défuzzification et base de connaissance.

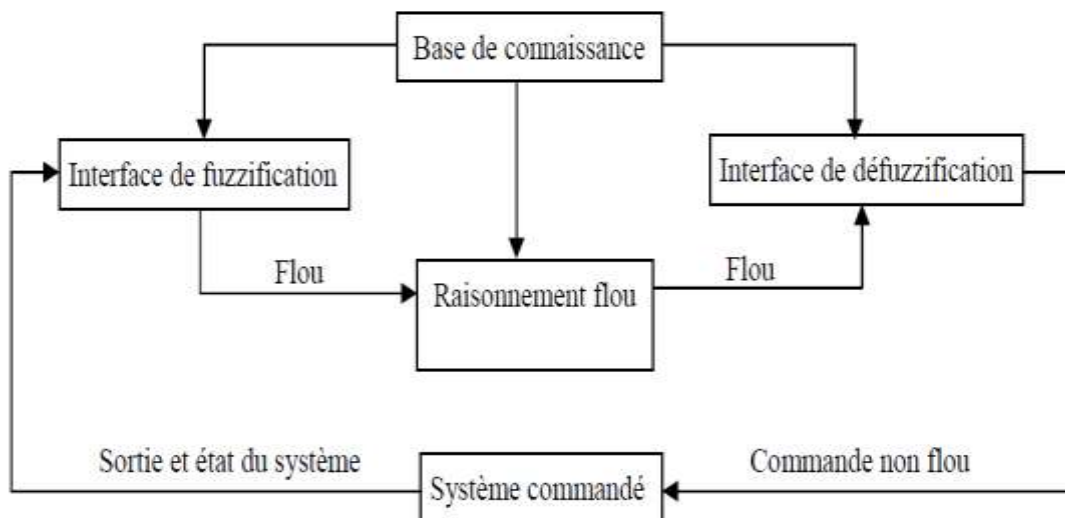


Figure IV.6 : Structure interne d'un régulateur flou.

IV.7.1. Fuzzification :

Les variables d'entrée et de sortie choisies pour modéliser ou commander un système sont des grandeurs numériques. L'étape de fuzzification consiste à transformer ces grandeurs réelles en variables linguistiques en vue d'un traitement d'inférence. Ainsi, à chaque variable d'entrée et de sortie est associé des ensembles caractérisant les termes linguistiques pris par ces variables. Ces termes seront utilisés pour écrire les règles d'inférence. [ELO09]

IV.7.2. Inférence Floue :

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles. [ALO16]

IV.7.2.1. Inférence Mamdani

L'inférence Mamdani procède selon quatre étapes :

- Fuzzification des variables d'entrée
- Evaluation des règles
- Agrégation des sorties des règles
- Défuzzification

On prend l'exemple d'un système de contrôle d'un ventilateur de maison, ayant 2 entrées (température et humidité) et une sortie (vitesse du ventilateur). Des règles possibles sont :

SI x est A_1 OU y est B_1 ALORS z est C_1

SI x est A_2 ET y est B_2 ALORS z est C_2

SI x est A_3 ALORS z est C_3

Où x est la température, y est l'humidité et z est la vitesse du ventilateur.

Les ensembles flous sont :

A_1 = faible, A_2 = moyenne, A_3 = élevée

B_1 = sec, B_2 = humide

C_1 = lent, C_2 = moyenne, C_3 = rapide

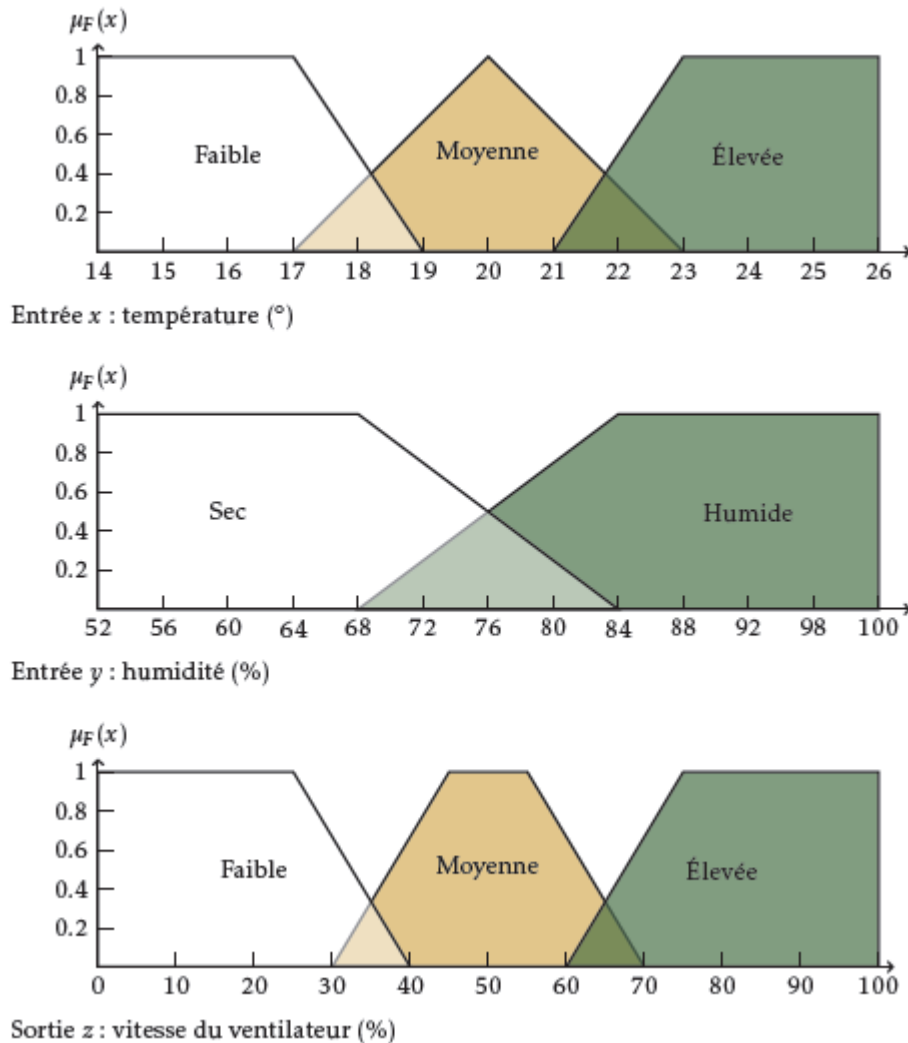


Figure IV.7 : Ensembles flous pour exemple d'inférence Mamdani.

IV.7.2.2. Inférence Sugeno :

La méthode de Sugeno permet de simplifier le calcul de l'agrégation, afin d'obtenir plus rapidement une solution nette. Cette méthode est souvent utilisée pour des applications à temps réel, où le temps de calcul est important. [GAB08]

La méthode de Sugeno utilise un seul pic comme fonction d'appartenance, plutôt qu'un polygone. Ce pic est un ensemble flou ayant une fonction d'appartenance 1 à un point particulier de l'espace, et 0 ailleurs. Le résultat de l'évaluation des règles devient l'amplitude du pic. [GAB08]

IV.7.3. Défuzzification :

Cette étape consiste à transformer la valeur linguistique issue de régulateur flou en valeur numérique. [GAB08]

IV.7.4. Base de connaissances :

La conception d'une base de connaissances représente la phase dans la conception des systèmes experts. Elle comprend la base de données et la base des règles floues. [ALO16]

IV.8. Avantages et inconvénients du réglage par Logique Floue :**IV.8.1. Avantages :**

- Pas besoin de modèle mathématique.
- Possibilité d'implémenter des connaissances linguistiques.
- Maîtrise de systèmes à régler avec un comportement complexe. [BEK16]
- 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. [GAB08]

IV.8.2. Inconvénients :

- Manque de directives précises pour la conception d'un réglage.
- Les règles doivent être disponibles.
- Aucune méthode formelle pour l'ajustement. [BEK16]
- Il est difficile de trouver la méthode correcte pour la défuzzification. Le calcul de la valeur de sortie nette, soit :
 - a) complexe, lent et correct.
 - b) rapide, mais avec un mauvais résultat. [GAB08]

IV.9. Conclusion :

Nous avons vu dans ce chapitre l'intérêt de la logique floue dans le domaine du contrôle de processus. Cette approche permet de tenir compte à la fois des connaissances d'un expert humain et de l'incertitude et de l'imprécision des données traitées par le contrôleur.

Pourtant, la conception d'un contrôleur flou n'est pas toujours chose aisée. Lorsqu'on utilise un contrôleur de type PID, on dispose de nombreux outils de synthèse permettant de choisir au mieux les paramètres du régulateur en fonction de la structure ou du modèle du système à commander.

En fait, le fonctionnement d'un contrôleur flou dépend d'un nombre très important de paramètres (fonctions d'appartenance, règles floues, règles d'inférence, défuzzification) qu'il faut régler lors de la conception. Comme ces paramètres s'influencent mutuellement, il est peu probable qu'une méthode de synthèse traitant indépendamment chaque sous système du contrôleur flou puisse fournir un résultat «optimal».

CHAPITRE V
RESULTATS DE SIMULATION

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats de simulations des procédés thermiques tels que la serre agricole et l'échangeur de chaleur. Une régulation de température a été faite par intermédiaire des régulateurs PID et flou.

V.2. Résultats de simulations :

V.2.1. Simulation de la serre agricole :

On veut faire la régulation de température d'une serre agricole. La mesure de la température est fournie par un capteur qui fournit la valeur de la grandeur à régler.

La fonction de transfert du système est supposé linéaire $H(s)$, de la forme :

$$H(s) = \frac{1}{(s+2)} e^{-s} \tag{V.1}$$

C'est un système de contrôle de température avec un élément de chauffage et de ventilation. La température de consigne (désirée) est de 20°C. La température extérieure est de 10°C et son effet intervient au niveau de l'intégrateur. [BEK16]

Pour la régulation de ce système, on propose deux solutions:

- 1^{er} cas : Régulation avec un correcteur PID.
- 2^{ème} cas : Régulation avec un correcteur flou.

V.2.1.1. Régulation de température de la serre avec régulateur PID sans perturbation:

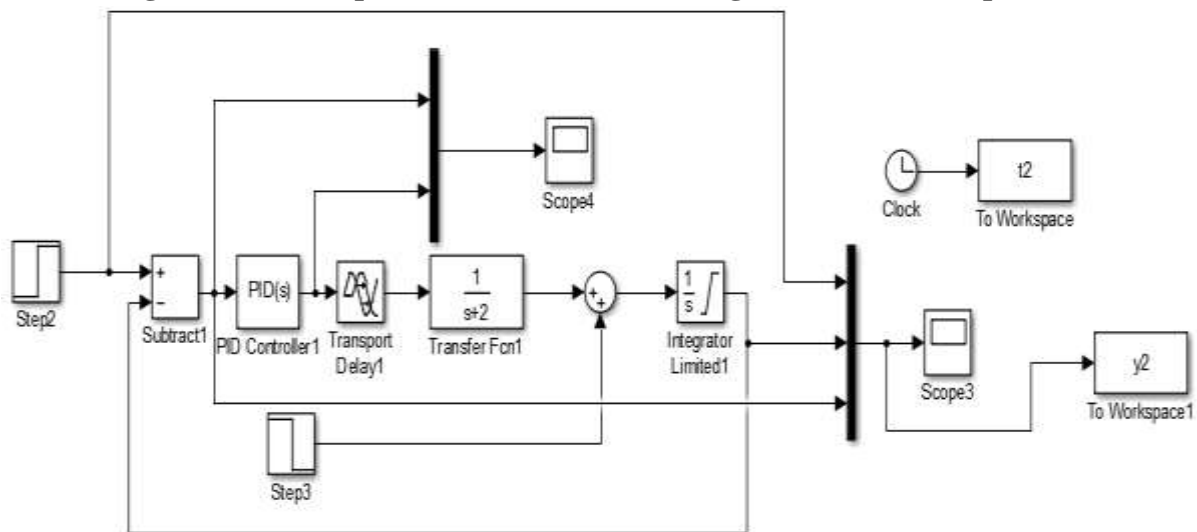


Figure V.1 : Schéma Simulink d'une serre avec un régulateur PID.

V.2.1.2. Paramètres du système simulé:

Les paramètres de la serre agricole sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.1: Paramètres de simulation de la serre agricole.

Step = 20°C	Integrator: CI = 10	Transport Delay = 1	Les paramètres de PID choisis sont : Kp=1, Ki=0.2, Kd=1
Step1 = -1.5°C	Lower saturation limit = 10		

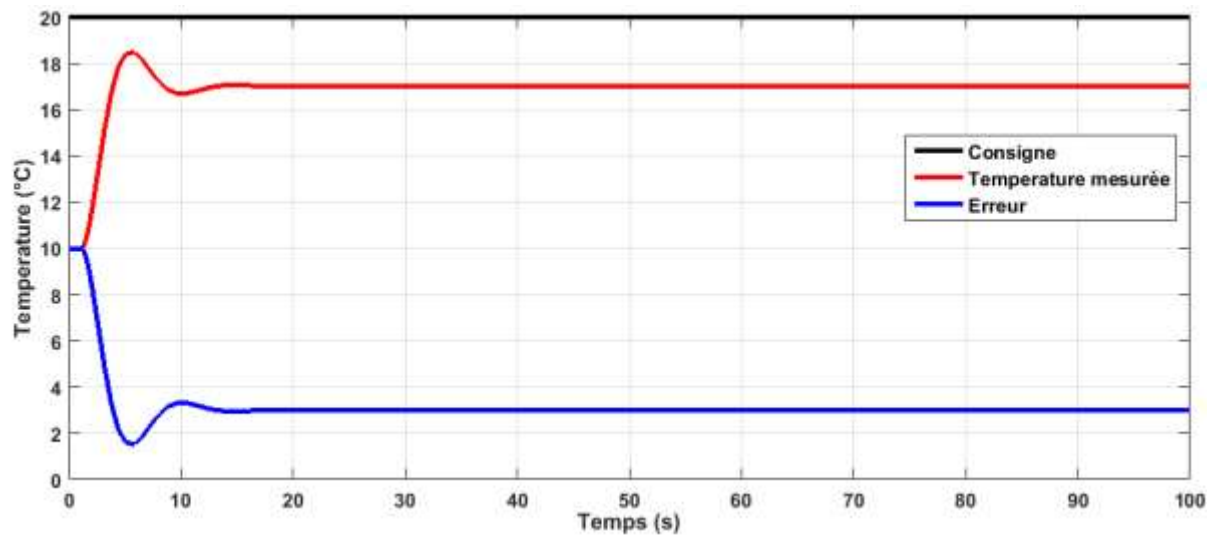


Figure V.2: Réponse du système avec un régulateur PD.

Lorsqu'on utilise un régulateur PID avec $K_p=1$ $K_i=0$ $K_d=1$ on remarque que le système est stable avec un dépassement mais la réponse présente une erreur importante, en effet la régulation avec un PD n'est pas efficace dans ce cas.

V.2.1.3. Régulation de température de la serre avec régulateur PID avec perturbation:

On a fait une régulation de température de la serre avec une perturbation à l'instant $t=60$ s en utilisant le régulateur PID.

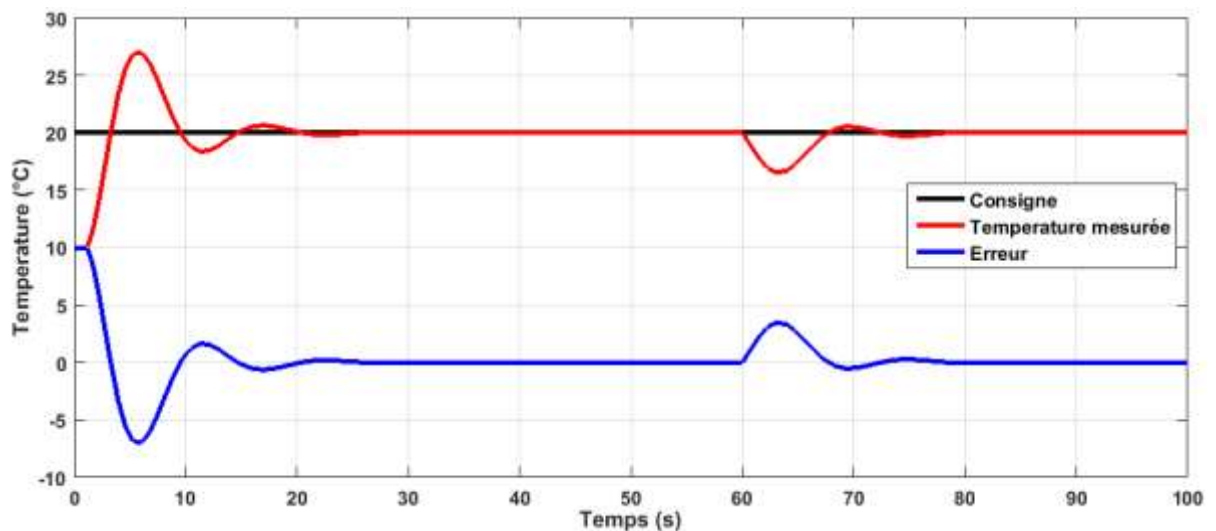


Figure V.3 : Réponse du système avec un régulateur PID avec une perturbation

Lorsqu'on augmente le K_i à 0.2, on remarque que le système atteint la consigne mais avec un grand dépassement par rapport les résultats précédentes.

V.2.1.4. Régulation de la serre avec régulateur Flou :

On considère le même système montré de la figure V.1, mais ici on remplace le régulateur PID par un régulateur flou. (Voir la Figure V.4):

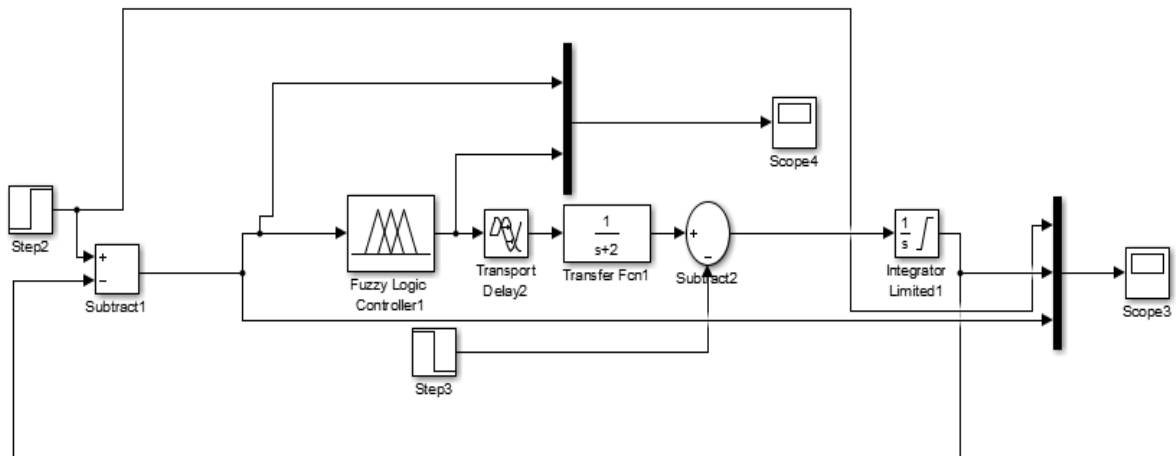


Figure V.4 : Régulation avec un correcteur flou.

Pour construire notre régulateur flou (Fuzzy Logic Controller), on commence tout d'abord par définir l'entrée et la sortie, On prendra pour entrée l'erreur, c'est l'écart de température et pour la sortie la commande (en tapant Fuzzy à la ligne de commande, on obtient alors le fis Editor de Matlab).

Ensuite on définira les plages de variations (les ensembles flous) et les fonctions d'appartenance en utilisant l'interface (Edit Membership function), ceci et pour l'entrée et pour la sortie.

Les fonctions d'appartenance utilisées sont de type Trimf (triangulaires).

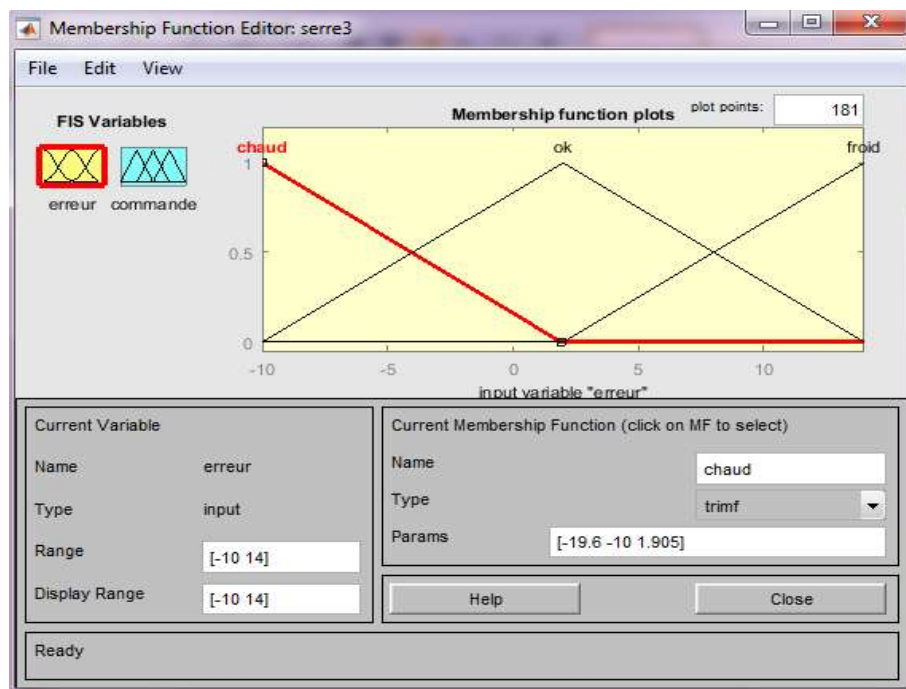


Figure V.5 : Fuzzification des variables d'entrée (l'erreur).

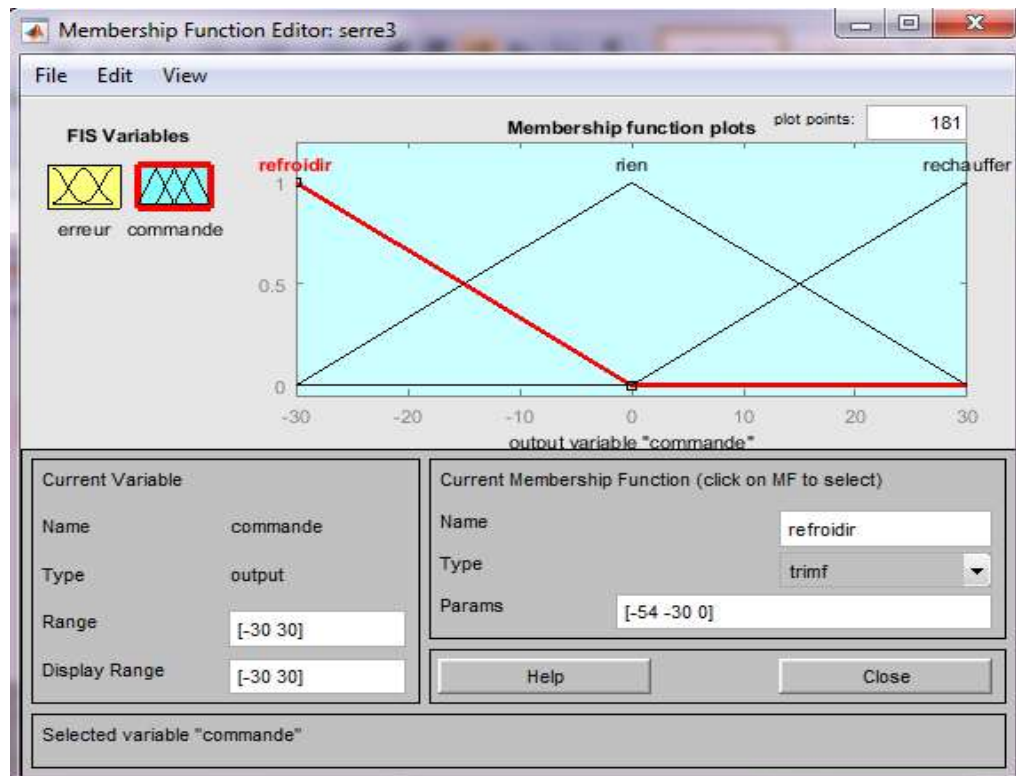


Figure V.6 : Fuzzification des variables de sortie (la commande).

Une fois le type de fonction d'appartenance choisie ainsi que la plage de variation on appellera chaque partie de la fonction d'appartenance par un nom significatif on aura alors :

Lorsque l'erreur est négative, la température de sortie est supérieure à la consigne donc c'est **chaud**, Lorsqu'elle est positive la fonction d'appartenance est nommée **froid**, et la partie du milieu sera nommée **OK**.

On fera de même pour la commande, la partie décroissante sera nommée **refroidir**

(Elle correspond à l'entrée **chaud**), la partie croissante sera nommée **réchauffer**, et les deux segments du milieu sont assignés à une commande appelée **rien**.

Les règles d'inférences seront alors définies comme suit :

- Si c'est **chaud** alors **refroidir**.
- Si c'est **Ok** alors **rien** faire.
- Si c'est **froid** alors **réchauffer**.

Le système d'inférence flou sera de type Mamdani et la défuzzification se fera avec la méthode centroïde. [BEK16]

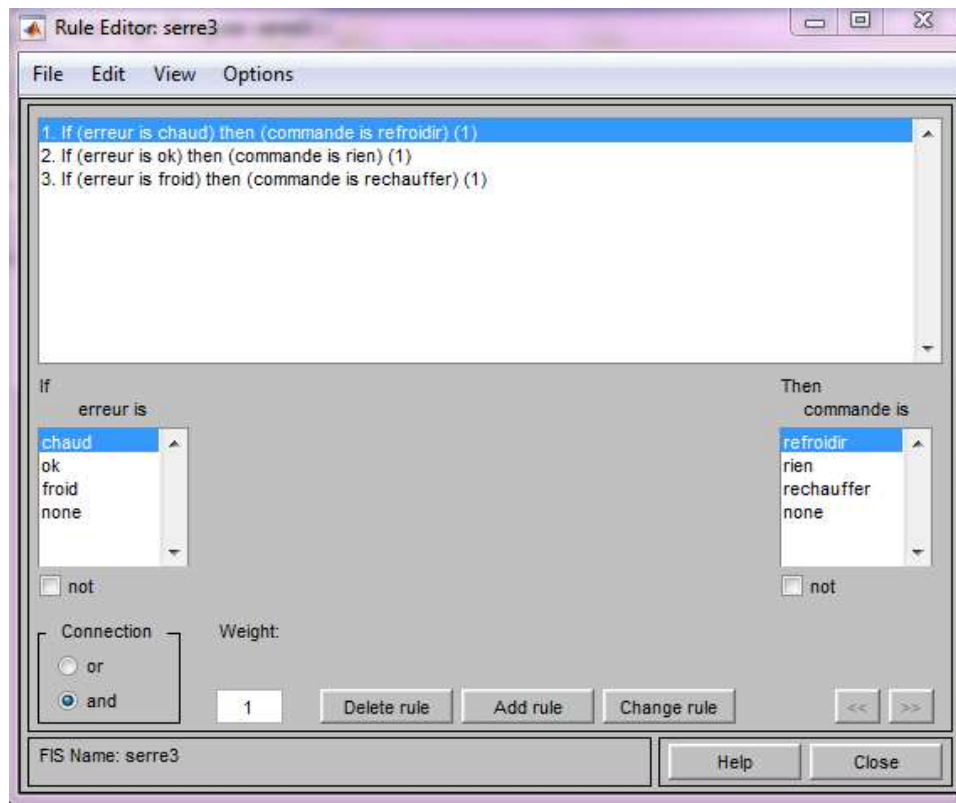


Figure V.7 : Règles flou.

Lorsqu'on fait la simulation du système avec le régulateur flou, on obtient le résultat suivant :

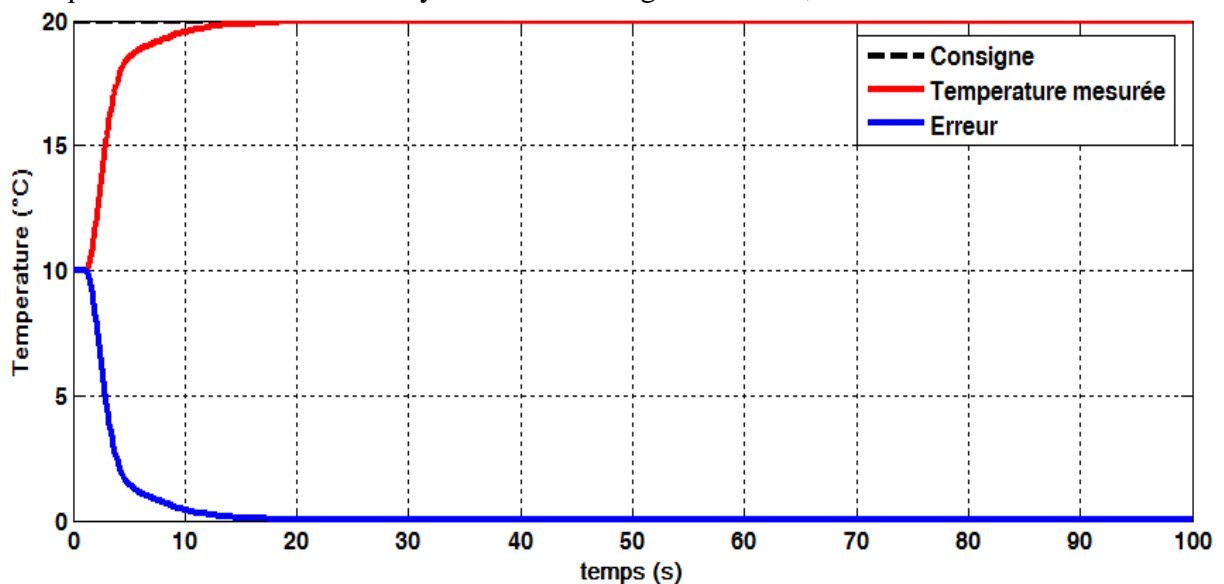


Figure V.8 : Régulation de la température de la serre avec un régulateur flou.

Lorsqu'on remplace le régulateur PID avec le régulateur flou on remarque que l'erreur statique est nulle et il n'y a pas un dépassement.

Tableau V.2: Comparaison des paramètres.

Paramètre	PD	PID	FLOU
Temps de montée (s)	2.7	2	1.6
Dépassement (%)	8.82	35.5	-
Temps d'établissement du régime stationnaire (s)	13	17	11
Temps de dépassement	6	7	-

V.2.2. Simulation de l'échangeur :

V.2.2.1. Régulateur PID

Le schéma blocs de contrôle d'un échangeur de chaleur (boucle fermée) est représenté dans la figure V.9

Dans ce schéma blocs un régulateur PID classique est utilisé.

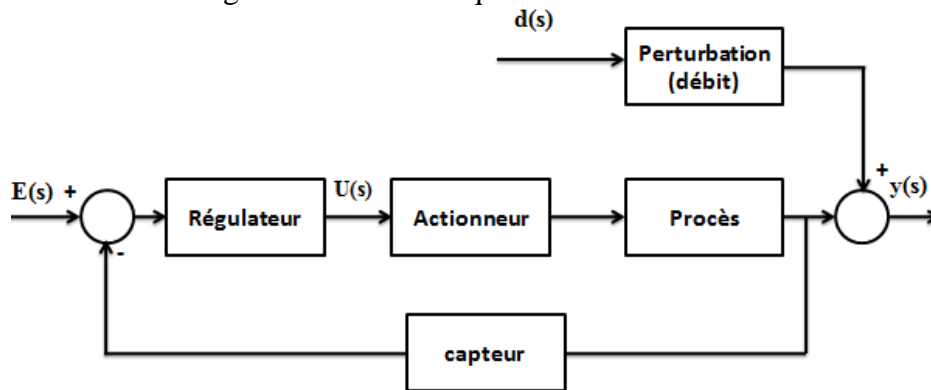


Figure V.9 : schéma blocs de contrôle d'un échangeur de chaleur (boucle fermée).

V.2.2.2. Simulation de l'échangeur de chaleur avec un régulateur PID optimisé:

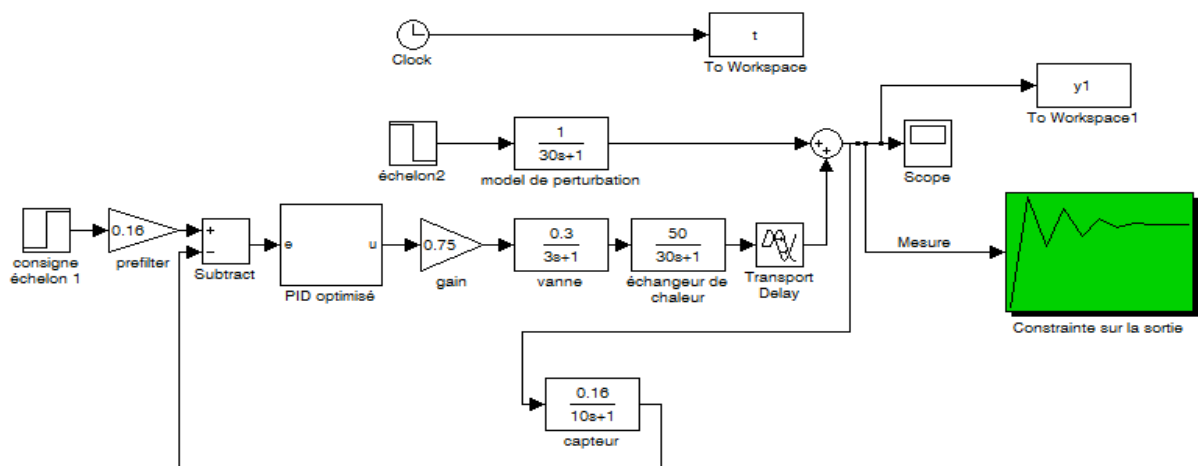


Figure V.10 : Schéma Simulink d'un échangeur de chaleur avec un régulateur PID optimisé.

Lorsqu'on fait la simulation du système avec le régulateur PID optimisé avec les paramètres : $K_p=2.92$, $K_i=0.12$, $K_d=15$, on obtient le résultat suivant :

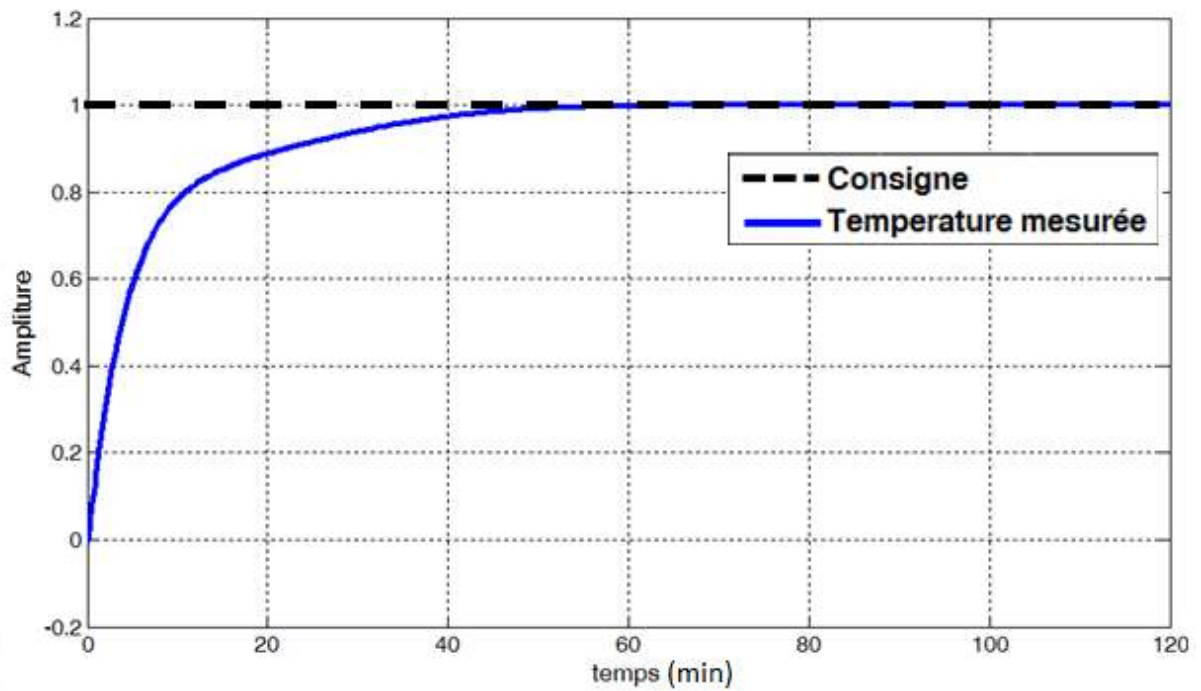


Figure V.11 : Réponse indicielle de l'échangeur de chaleur avec PID optimisé.

Lorsqu'on utilise le régulateur PID optimisé, on remarque que notre système est stable et il atteint la consigne.

V.3.Conclusion :

D'après les résultats de simulations des procédés thermiques, on peut déduire que la Commande floue donne des résultats précieux par contre la commande PID perd ses performances notamment en terme de (stabilité, dépassement et de précision dynamique), et le régulateur flou reste le plus robuste.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le but de notre travail est d'étudier en simulation le contrôle de température des procédés thermiques, puis de faire une comparaison entre la commande PID et la commande floue. Le premier procédé est une régulation de température d'un échangeur tubulaire coaxial. Le deuxième procédé consiste à faire la régulation de température d'une serre agricole.

Dans un premier temps, nous avons simulé, à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK les deux systèmes avec un régulateur PID

Dans un deuxième temps nous avons simulé la serre agricole avec le régulateur flou. En ce qui concerne l'échangeur de chaleur, on n'a pas pu le simuler avec ce régulateur à cause de sa difficulté et on n'a pas trouvé tous ses paramètres nécessaires (règles et ensembles flous) qui sont définis par des experts.

Ces résultats nous ont permis de confirmer l'avantage d'une commande floue par rapport à une commande PID, notamment lorsque le procédé est non linéaire, ou il présentait un retard important.

Dans ce cas, on peut dire que la commande floue constituera un complément précieux à la commande PID.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 [ETI14] ETIQUE Michel: « régulation automatique (reg)» 2014.
- 2 [COR09] CORREVEON Marc : « systèmes électroniques».2009.
- 3 [BOU10] BOUISFI Ashraf & BELRHALI Yasser: « étude en simulation d'une régulation thermique par logique flou » 2010.
- 4 [MUD02] MUDRY Freddy : « Ajustage des paramètres des régulateurs pid » Ecole d'ingénieurs du canton de vaud-Département d'électricité et informatique. 2002.
- 5 [ALO06] ALOUAN Fouad : « Commande par Logique Floue Appliquée aux pendules inversés et au Simulateur de Vol d'Hélicoptère : Simulation et Expérimentation». l'Université de Mohamed Boudiaf de M'sila, soutenue : le 24/06/2006
- 6 [CAM10] CAMUS Michael, DEGUINE Etienne, ROSS Daniel « régulation par pid» 2010.
- 7 [ZAM09] ZAMBETTAKIS i. « la régulation PID ».IUT de Tarbes.2009.
- 8 [BEK16] BEKAKRA Youcef « cours techniques de commande». 2016. université d'Eloued.
- 9 [DOC01] https://fr.wikipedia.org/wiki/r%c3%a9gulateur_pid.
- 10 [DOC02] <http://www.acsysteme.com/fr/pid-serie-ou-parallele>.
- 11 [BEN08] BENAYAD Nada: « étude et optimisation des échangeurs de chaleur ».2008.
- 12 [ROU12] E.ROULAND : « les échangeurs thermiques ».2011/2012.université de Rouen.
- 13 [LAK12] LAKRIDER HAMIDA Karima : conception d'un réseau des échangeurs de chaleur optimal- approche exégétique 2010. Thèse de doctorat Université Hassiba BEN BOUALI de CHLEF.
- 14 [TOB02] TOBALY Pascale: « échangeur de chaleur ». IUT de St Denis Licence Professionnelle Module Ingénierie des Systèmes Multi technique, 2002, 14.
- 15 [DEL12] DELROT Sabrina. « Détection de l'encrassement dans un échangeur de chaleur par observateurs de type takagi-sugeno ». 2012. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes et du hainaut-cambresis.
- 16 [MAT02] MATHIEU Richard: « les échangeurs de chaleur » 2002.
- 17 [MUK16] MUKHERJEE Sabyasachi & P. SIVANIRANJAN: « design of a temperature control system using matlab for milk process plant » 2016.
- 18 [DOC03] <http://www.recuperation-chaleur.fr/echangeur-tubulaires>.
- 19 [NEH11] ALI NEHARI Amine. Etude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaques et joints: application aux fluides géothermiques. 2011. Université Abou-Bakr Belkaid De Tlemcen Département de Physique.
- 20 [DIA10] DIAB Mokeddem : « contrôle flou des processus biotechnologiques à base d'algorithmes génétiques ». 2010. Thèse de doctorat. Université de jijel.
- 21 [GAB08] Gabriel CORMIER : « cours logique floue chapitre 11 ». 2008 .Université de Moncton.
- 22 [ELA14] EL AFOU Youssef: « contribution au contrôle des paramètres climatiques sous serre » 2014 Thèse de doctorat. Univesité de Lille 1.
- 23 [AGR10] Innovagro consultants « valorisation des rejets thermiques industriels et agro-industries ».2010.
- 24 [MEB12] MEBAREK-LOUDIMA Fateh « cours échangeurs de chaleur ».2012. Université de Rouen.
- 25 [PAD14] PADHEE Subhransu : « controller design for temperature control of heat exchanger System: simulation studies» WSEAS Trans. Syst Control, 2014, 9 :485-491.
- 26 [MUK16] MUKHERJEE Sabyasachi & P. SIVANIRANJAN « design of a temperature control system using matlab for milk process plant» 2016.
- 27 [SRI14] SRIVASTAVA Neeraj, TANTI Deoraj Kumar, AHMAD Md Akram «matlab simulation of temperature control of heat exchanger using different controllers. Automation, contrôle and intelligent systems» 2014, 2.1 :1-5.
- 28 [DOC04] <https://www.aujardin.info/fiches/serre-ventilation.php>
- 29 [DOC05] <https://www.agrimaroc.ma/la-technique-des-cultures-aventages-et->

- inconvenions/
30 [DOC06] <https://www.aujardin.info/fiches/serre-chauffage.php#1D7075pjAieD0JKy.99>
- 31 [DJA15] DJAFRI Saadane : « amélioration du rendement des cultures sous serre par stockage de l'énergie solaire » 2015. Université de Kasdi Merbah OUARGLA
Département des énergies renouvelables.
- 32 [ELO09] ELOUGLI Albedlghani : « Intégration des techniques floues à la synthèse de contrôleurs adaptatifs »2009.thèse de doctorat .Université de Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès.