

## **REMERCIEMENTS**

Louange à Dieu que sa grâce soit juste, et grâce à lui les bonnes et les bénédictions sont révélées, et par sa grâce les buts et objectifs sont accomplis. Nous souhaitons à remercier le Dieu pour la force et l'aide pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier monsieur **KACIMI Abderrahmane** notre encadreur de projet de fin d'étude qui nous suivit jusqu'à la fin de ce travail pendant toute cette période, et merci pour ses conseils et ses orientations objectifs.

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui ont collaboré à réaliser ce projet de fin d'étude de près ou de loin.

*Avec beaucoup de plaisir et de joie, je dédie ce travail à mes chers parents et je les remercie pour leur soutien et leur encouragement depuis ma naissance jusqu'à le jour présent.  
Je dédie aussi ce travail à tous les membres ma famille et mes frères et mes sœurs.*

*A. LATROCH*

*Je dédie ce mémoire*  
*A mes cher parents ma mère et mon père*  
*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*  
*A mes frères*  
*A mes amis, en particulier LATROCH Abdelilah et mes camarades*  
*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de*  
*l'enseignement supérieur*

*M. HADJ*

# **TABLE DES MATIERES**

## TABLE DES MATIERES

Remerciements .....	1
Dédicaces .....	2
Table des matières .....	4
Liste des symboles .....	7
<b>Introduction général .....</b>	<b>8</b>

### CHAPITRE I

#### Modélisation d'échangeur thermique et description de la maquette

I.1. Historique de l'échangeur thermique .....	12
I.2. Définition d'échangeur thermique .....	13
I.3. Description de maquette .....	14
I.4. La plateforme du processus de température .....	15
I.4.1. Les composantes du système .....	16
I.4.1.1. Echangeur de Chaleur .....	16
I.4.1.2. Pompe Electrique .....	16
I.4.1.3. Servovalve.....	17
I.4.1.4. Débitmètre .....	17
I.4.1.5. Chauffage d'eau .....	18
I.5. Conclusion.....	19

### CHAPITRE II

#### Notions générales sur la régulation

II.1. Introduction .....	21
II.2. Définition .....	21
II.3. La régulation avec un régulateur PID .....	22
II.3.1. Les actions de PID .....	22

II.3.1.1. Action Proportionnelle .....	22
II.3.1.2. Action Intégrale.....	22
II.3.1.3. Action dérivée .....	22
II.3.2. Les structures et les montages de PID .....	23
II.3.2.1. La structure série .....	23
II.3.2.2. La structure parallèle.....	23
II.3.2.2. La structure mixte .....	24
II.3.3. Réglage de PID .....	24
II.3.4. Les méthodes de réglage de PID.....	25
II.3.4.1. Ziegler-Nichols .....	25
II.3.4.2. Méthode analytique empirique.....	27
II.4. Conclusion.....	28

## CHAPITRE III

### Simulations et résultats

III.1. Introduction.....	30
III.2. Calcul des régulateurs.....	31
III.2.1. La méthode de Ziegler-Nichols du régulateur PI .....	31
III.2.2. La méthode empirique du régulateur PI .....	32
III.2.3. La méthode empirique du régulateur PID .....	33
III.3. Rejet des perturbations d'échelon .....	35
III.3.1. La méthode de Ziegler-Nichols.....	35
III.3.2. La méthode empirique en PI .....	36
III.3.3. La méthode de empirique en PID.....	37
III.4. Conclusion .....	37
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>38</b>
Références .....	40

## LISTE DES SYMBOLES

P	Régulateur avec action proportionnelle.
PI	Régulateur avec action proportionnelle et intégrale
PID	Régulateur avec action proportionnelle et intégrale et dérivée
K	Gain statique
$K_p$	Gain de l'action proportionnelle
$T_i$	Temps d'action intégrale
$K_i$	Gain d'action intégrale.
$T_d$	Temps d'action dérivée
$K_c$	Gain critique
$T_c$	Temps critique
$T_u$ et $T_a$	Paramètres de la réponse indicielle
$C(p)$	Fonction de transfert de régulateur
TPR	Plate-forme du processus de température
$G(s)$	Matrice de transfert d'échangeur thermique
$T_1$ et $T_4$	Températures de sortie dans l'échangeur thermique

# **INTRODUCTION GENERALE**



## INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes industriels sont complexé à cause de l'intégrité des ses composantes et ses dispositifs avec la variation et la non-stabilité des variables et des grandeurs physiques qui déterminent l'état de fonctionnement de ces systèmes, et comme ces grandeurs appartiennes au domaine physique et dans ce dernier le cas idéal et parfait n'existe pas, donc elles sont exposées à certaines variations inadmissibles à cause des perturbations externes qui influent sur la réponse du système, et dans le but d'avoir de bons résultats, et pour assurer le bon rendement et la stabilité du système, on doit utiliser la régulation pour limiter l'effet des perturbations sur ses performances.

Le candidat par excellence de la régulation automatique dans les applications industrielles est le PID, avec ses déférents méthodes de réglage comme la méthode de Ziegler Nichols et la méthode empirique, notre choix c'est dirigé vers ces deux techniques à cause de leur large utilisation dans la conception des régulateurs industriels, la première est connue par sa simplicité et son efficacité, néanmoins elle souffre de certaines lacunes comme les réponses avec des oscillations et la non satisfaction d'un cahier de charge, elle a besoin d'une opération de réglages qui peut être délicate et longue dans certains cas. La seconde méthode elle est conçue pour satisfaire un cahier de charge, ne nécessite pas de réglages, néanmoins elle est basée sur un certain formalisme mathématique mais assez maitrisé elle est donnée sous forme de formules toutes prêtes pour le calcul des paramètres du régulateur, elle est plus efficace que la première méthode.

Les grandeurs réglantes sont des tensions électrique et les grandeurs manipulées de sortie sont des températures, ces grandeurs sont est considérée comme un facteur principale et influenceur dans le cas des systèmes et les équipements thermiques c'est le cas d'échangeur thermique qui est notre thème d'étude dans ce PFE.

Avant de commencer notre étude et notre travail, on doit poser la problématique suivante : Comment faire la régulation de la température dans un échangeur thermique ?

Pour répondre à cette question nous avons décomposé ce travail en trois chapitres, avec une conclusion générale donnée par le plan suivants :

- Etude Théorique :

CHAPITRE 01: Modélisation de l'échangeur thermique et description de la maquette

CHAPITRE 02: Notions générales sur la régulation et les méthodes de réglage de PID comme la méthode de Ziegler Nichols et les méthodes empiriques.

- Résultats et simulations :

CHAPITRE 03: L'application de la méthode Ziegler Nichols et les méthodes empiriques pour la régulation de la température d'un échangeur thermique avec la simulation sur MATLAB.

- Une conclusion générale sur le travail.

# **CHAPITRE I**

## **Modélisation d'échangeur thermique et description de la maquette**

## I.1. Historique de l'échangeur thermique

L'échangeur thermique est un moyen connu dans l'histoire humaine depuis la civilisation Romaine, où il est connu à cette époque sous le nom de Calidaria.

L'échange de chaleur Calidaria est produite en faisant passer les fumées de combustion du bois en contact avec des dalles de pierre sur le côté opposé de ce qui a été fait passer l'eau à chauffer. Dans les temps plus tard, les fumées ont été faites pour passer à travers les canaux toujours pratiqués dans la pierre, réalisant ainsi un rudimentaire « faisceau de tubes. » Dans tous ces cas, cependant, il manquait le confinement du fluide froid (eau), puis la définition de l'échangeur est sujette à caution.



Figure I.1 : calidaria

En Moyen Âge, ils ont pris la place des échangeurs en vigueur les bobines utilisés dans la condensation du distillat (sont des échangeurs à faisceau tubulaire).

Entre XVIII-XIXe siècle ils ont été introduites les condensateurs et les chaudières qui utilisent la chaleur sensible gaz de combustion aux jours de la révolution industrielle et l'utilisation de la vapeur.

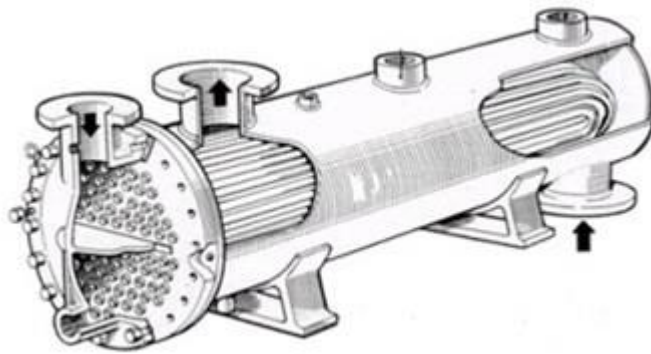
Vers la trentaine d'années du XXe siècle il a commencé à se détacher des surfaces tubulaires à utiliser des surfaces sensiblement plates (éventuellement en carton ondulé), ceux qui sont aujourd'hui utilisés dans les échangeurs de chaleur à plaques et spirales. Le premier échangeur de chaleur à plaques il a été introduit en 1923 par Richard Seligman, fondateur de l'Association APV. À partir des années 30 la propagation des échangeurs de chaleur en spirale, employé pour la première fois en Suède dans le cadre de l'industrie du papier. Dans la même période, nous sommes introduits dans des échangeurs de ramens éclats patentés.

En 1939 date de la fondation de l'Association tubulaires Echangeur Fabricants (TEMA), qui publie les règles de la classification, le dimensionnement et la construction des échangeurs, enveloppe et faisceau de manchon de tube.

En 1942 il est introduit dans le procédé  $\epsilon$ -NTU (utilisé pour estimer le rendement thermique d'un échangeur de chaleur) de Londres et Sebban.

## I.2. Définition d'échangeur thermique

L'échangeur thermique ou l'échangeur de chaleur est un équipement qu'il permet de transférer l'énergie thermique ou la chaleur entre deux fluides sans les mélanger et à travers le contact entre eux par la médiation d'une paroi qui elle est considérée comme une surface d'échange. Cette paroi possède une conductivité thermique caractérisée et bien déterminée qui elle assure la transition de flux de chaleur. Ce dispositif est utilisé largement dans la vie quotidienne comme les chauffes bain les radiateurs des voitures... et sur tout dans le domaine industriel comme les chaudières et les condenseurs ...qui on peut les trouvés beaucoup plus dans les centrales thermique comme les centrales de production d'énergie électrique.



**Figure I.2 :** échangeur thermique à type tubulaire

### I.3. Description de maquette

L'échangeur thermique est un équipement qu'il permet de transférer la chaleur entre deux fluides sans les mélanger. Pour comprendre la processus de control de la température entre ces fluides on utilise une maquette expérimentale (figure I.3), cette dernière est composée par un contrôle de processus formateur développé par Feedback Inc. (le PROCON Température Process Rig (38-600)), basé sur une chaleur échangeur, combiné avec (le PROCON Flow Rig (38-100)). La maquette est un système à deux boucles, utilisant l'eau comme fluide de processus, ce qui permet d'étudier principes de contrôle de processus en utilisant les températures des circuits primaires et secondaires comme variables de processus à contrôler. Le système se caractérise par :

- Plates-formes pour le contrôle du niveau et du débit, de la température et de la pression.
- Utilisez un contrôleur de processus standard de l'industrie.
- Utilisez des signaux standard 4-20 mA.
- Utilisez un bus de communication séries RS485 standard ou Protocol Ethernet.
- Haut degré de modularité - facilement reconfigurable.
- Logiciel de découverte.
- Entièrement protégé par un disjoncteur différentiel.



**Figure I.3** : maquette expérimentale

#### I.4. La plateforme du processus de température :

La maquette est un système à deux boucles, utilisant l'eau comme fluide de processus, ce qui permet d'étudier principes de contrôle de processus en utilisant les températures des circuits primaires et secondaires comme variables de processus à contrôler.

La plate-forme du processus de température (TPR) se compose de deux circuits d'écoulement: primaire et secondaire, Le circuit d'écoulement primaire fait partie intégrante du TPR, tandis que le circuit d'écoulement secondaire est dérivé à partir de l'une des deux sources selon la configuration du laboratoire. Si la configuration d'un laboratoire se compose uniquement d'une plateforme du processus de température, le flux secondaire est alimenté par le réseau d'eau qui est contrôlé par la valve auxiliaire en option.

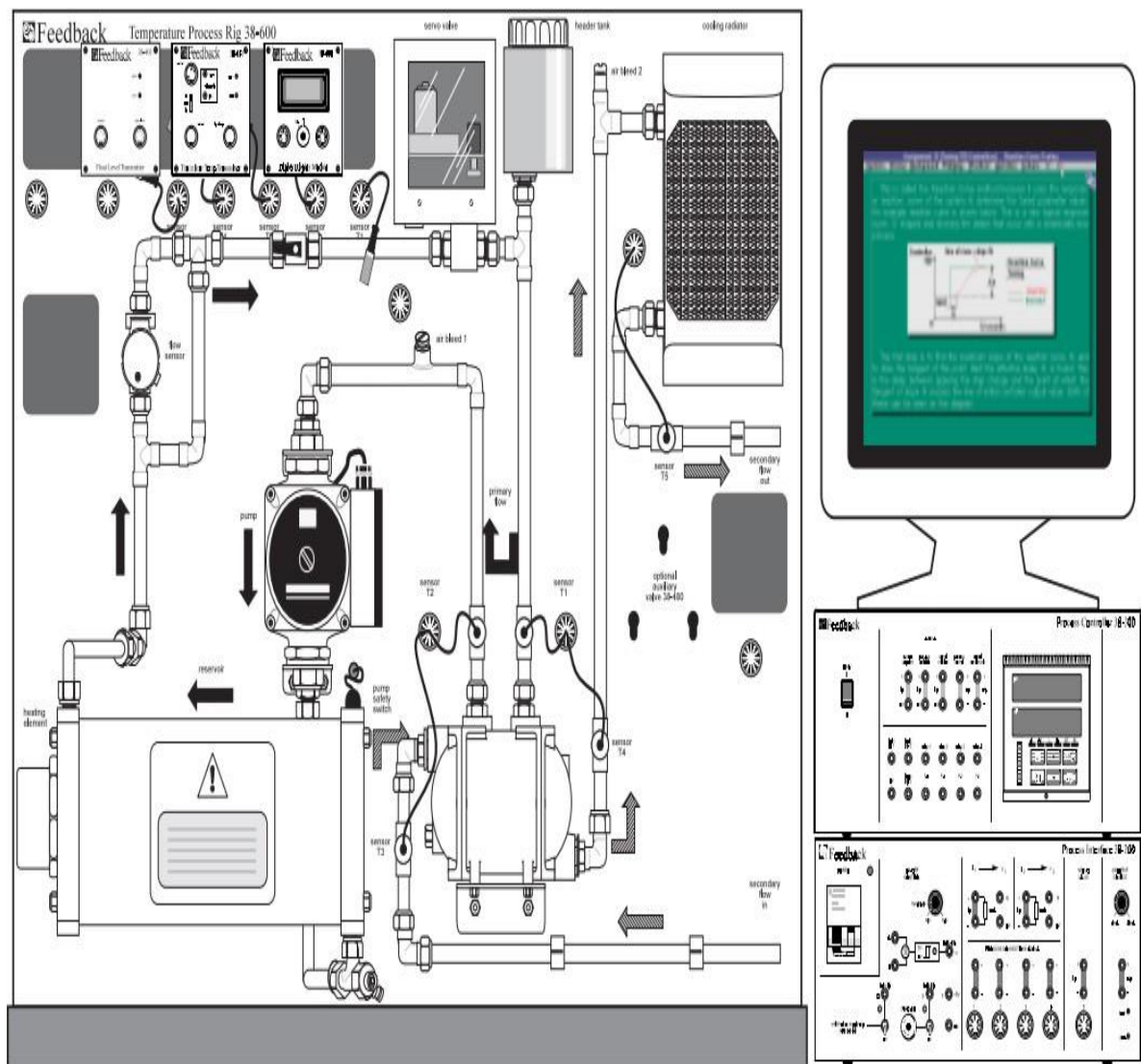


Figure I.4: La plateforme du processus de température

#### I.4.1. Les composantes du système :

##### I.4.1.1. Echangeur de Chaleur :

Un échangeur de chaleur, comme son nom l'indique, est un composant de processus pour le chauffage ou le refroidissement des fluides de procédé, au moyen d'un fluide caloporteur isolé. L'échangeur de chaleur du système est un échangeur à tubes et à calandre. Sa fonction est de transférer la chaleur entre le flux primaire et le flux secondaire, qui est fourni soit par le processus de base, soit par la vanne auxiliaire en option.

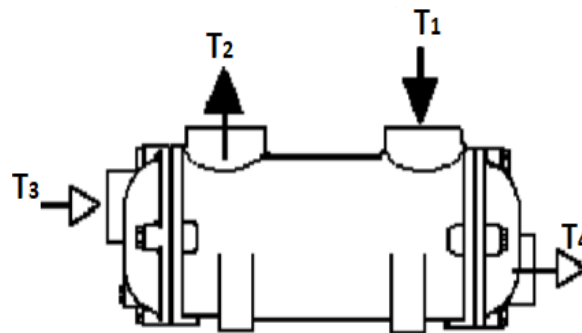


Figure I.5 : échangeur de chaleur

##### I.4.1.2. Pompe Electrique:

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un liquide, La pompe utilisée pour le circuit primaire est une pompe de chauffage central domestique de base. La pompe elle-même est un Grundfos Selectric, comme on peut le voir ci-dessous :



Figure 1.6: Pompe Electrique (Grundfos Selectric)



Le moteur est un rotor humide à induction à cage d'écureuil à trois vitesses, fonctionnant dans des roulements lubrifiés à l'eau et ne doit jamais fonctionner à sec. Il peut produire une pression maximale du système de 10 bars et fonctionner sur une plage de température de l'eau de + 2 C° + 110 C°.

#### I.4.1.3. Servovalve:

Un système d'asservissement est un système de contrôle, conçu de telle sorte que sa sortie suive une entrée de valeur souhaitée avec le minimum d'erreur. Le principe de fonctionnement de la servovalve est le même, Elle utilise une porte pour bloquer le chemin du liquide à travers la vanne et puisque la porte est en effet abaissée à la demande, elle peut prendre n'importe quelle position entre 100% ouverte et 100% fermée.

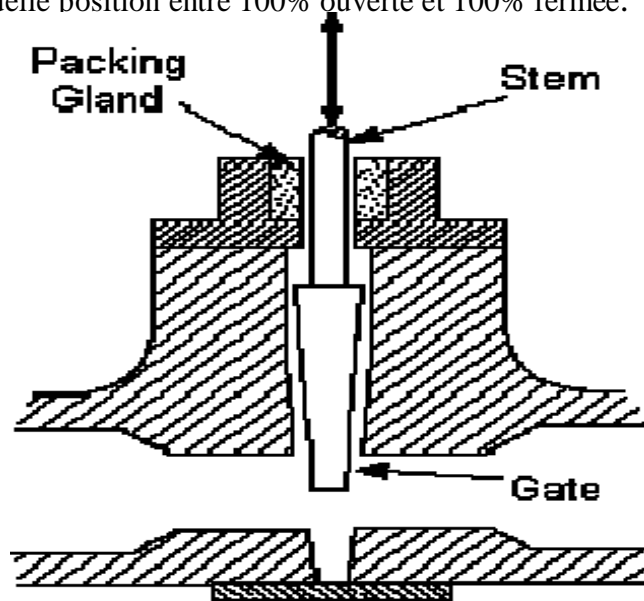
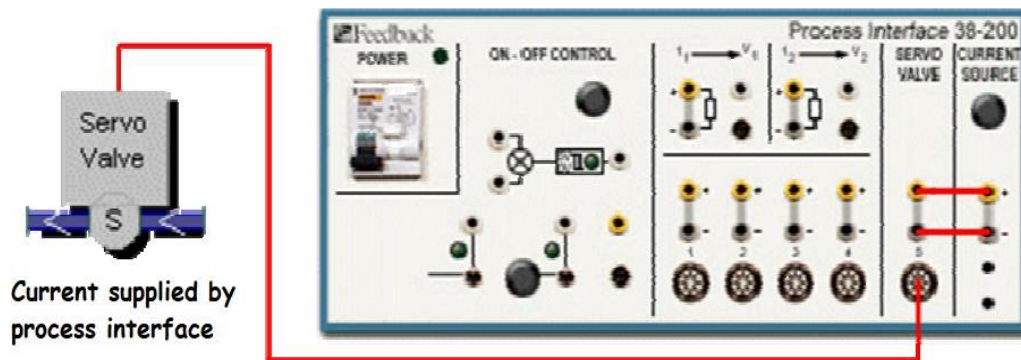


Figure I.7: Servovalve

#### I.4.1.4. Débitmètre :

La valeur du débit pour un courant particulier est obtenue à partir du débitmètre visuel, tandis que la valeur du courant est obtenue à partir du module d'affichage numérique (DDM) connecté en série avec la servovalve. L'ouverture de la vanne est contrôlée par l'amplitude du courant fourni par l'interface de processus 4 - 20mA « source de courant ». Cette ouverture de porte définit la quantité d'eau qui passera à travers la valve dans un temps, c'est-à-dire le débit.



**Figure I.8 :** Connexion entre débitmètre et interface du processus

#### I.4.1.5. Chauffage d'eau:

Le chauffe-eau se présente sous la forme d'un réservoir (ou cuve), muni d'un système de chauffage, d'une résistance, d'un thermostat de régulation et d'un système de prévention de la corrosion (anode magnésium, anode titane ACI ou anode ACI Hybride en titane/magnésium).

L'arrivée d'eau froide sous pression remplit le réservoir au fur et à mesure qu'il se vide. L'eau froide rentre par le bas de la cuve, pour y être chauffée progressivement et automatiquement sous l'effet de la résistance électrique.

Le système est réglé de telle sorte que si la température de l'eau dans le réservoir atteint celle réglée sur le thermostat, le chauffage sera éteint par un interrupteur passé d'une commutation de MOSFET, par commande du chauffage 24 V DC à droite du panneau arrière contrôle un diode pour allumer et éteindre le chauffage.



**Figure 1.9:** Thermostat de chauffe-eau

### **I.3. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons donné une description de la maquette expérimentale d'un échangeur thermique, nous avons décrit tous ces composants matérielles qui vont être utilisés pour tester la régulation de la température.

## **CHAPITRE II**

### **Notions générales sur la régulation**

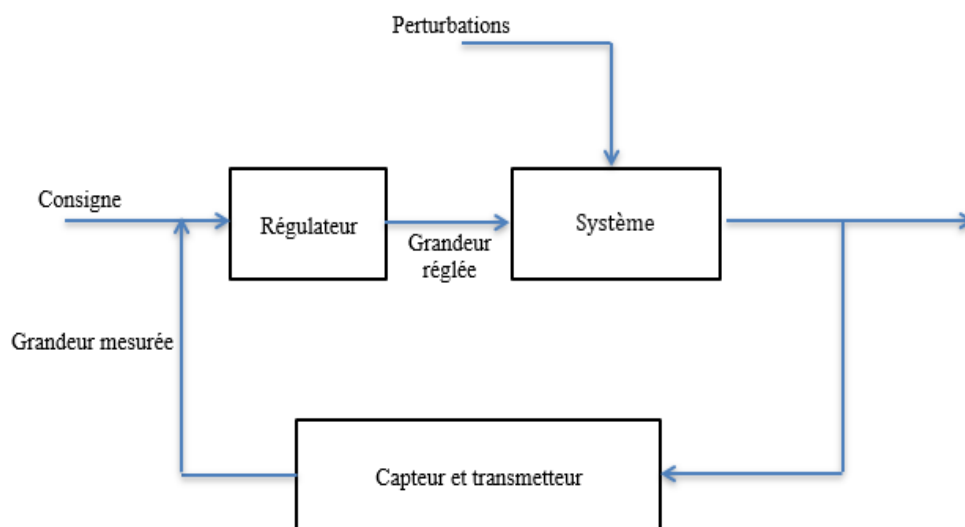
## II.1. Introduction

Dans l'histoire et en précision dans les années de XX<sup>ème</sup> siècle, la civilisation humaine a commencé à compter sur l'automatique comme une science après les obligations qui elles sont imposées par le développement dans différents domaines industriels comme le domaine de gisement et l'exploitation dans le domaine d'hydrocarbure et pétrolière, en navigation, l'aviation et dans les industries des armes de pointes... , avec le temps et après les progressions dans le domaine électronique et l'informatique industrielle, la régulation est introduite dans les procédés de fabrication automatisés.

L'idée de régulation des systèmes était toujours en développement afin de maîtriser et asservir plusieurs grandeurs physiques telles que la température, le débit et la pression... dans le but de gagner le temps et de améliorer le rendement de ces systèmes.

## II.2. Définition :

La régulation automatique est la technique utilisée pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système comme la température, la pression, le niveau, le débit, ...etc. En vue d'en imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des niveaux prédéfinies par l'action d'élimination des perturbations dans le système dans le but de régler automatiquement la grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée. Cette opération se fait par un instrument qu'ils s'appellent le régulateur, et elle sera appliquée physiquement par l'actionneur, et les grandeurs sont mesurées et captées par les capteurs.



**Figure II.1 :** Schéma globale de la boucle de régulation

### **II.3. La régulation avec un régulateur PID :**

La régulation PID est un type de régulation automatique ce fait par un régulateur de type PID, ce mot c'est l'abréviation de « P (Proportionnelle), I (Intégrale) et D (Dérivée) », l'utilisation de ce type de régulateur donne un avantage par sa performance dynamique et sa précision de réglage et sa stabilité comme elle permet de contrôler un grand nombre de procédés, c'est pour ça il est plus utilisé dans l'industrie.

#### **II.3.1. Les actions de PID :**

##### **II.3.1.1. Action Proportionnelle :**

Elle permet de réduire l'erreur statique (améliorer la précision) :

- Plus l'action est grande ( $K$  grand), plus l'erreur statique est réduite.
- Plus l'action est grande, plus les oscillations sont importantes durant le régime transitoire.
- Un excès d'action ( $k$  très élevé) conduit à l'instabilité du système.

##### **II.3.1.2. Action Intégrale:**

Elle permet de supprimer l'erreur statique :

- Plus la constante  $T_i$  est petite, plus l'action intégrale est forte.
- Une action excessive ( $T_i$  trop petit ou  $K_p$  trop grand) conduit a une instabilité du système (du a l'augmentation du déphasage).

##### **II.3.1.3. Action dérivée:**

Plus  $T_d$  est grand plus l'action dérivée est forte,  $T_d$  très forte permet de :

- Réduire le dépassement ou les oscillations obtenues en action proportionnelle seule.
- Accélérer la réponse mesurée.
- Améliorer la stabilité du système (apport d'une avance de phase).

L'action dérivée est limitée par un excès d'action qui peut conduire à l'instabilité du système.

### II.3.2. Les structures et les montages de PID :

#### II.3.2.1. La structure série :

$$C(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) (1 + T_d p)$$

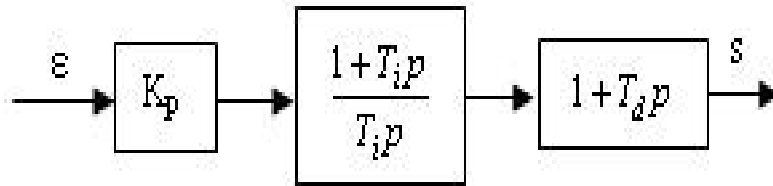


Figure II.2 : Boucle de régulation PID en structure série

#### II.3.2.2. La structure parallèle :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p$$

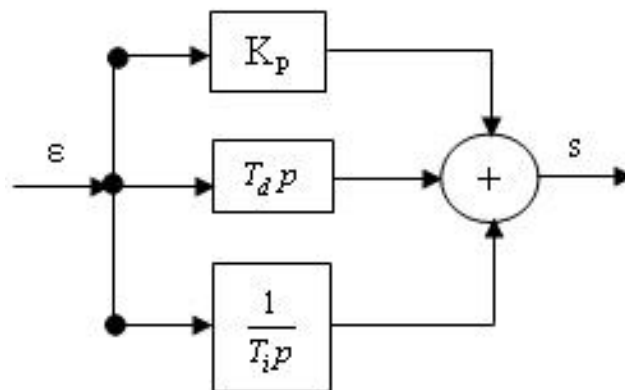
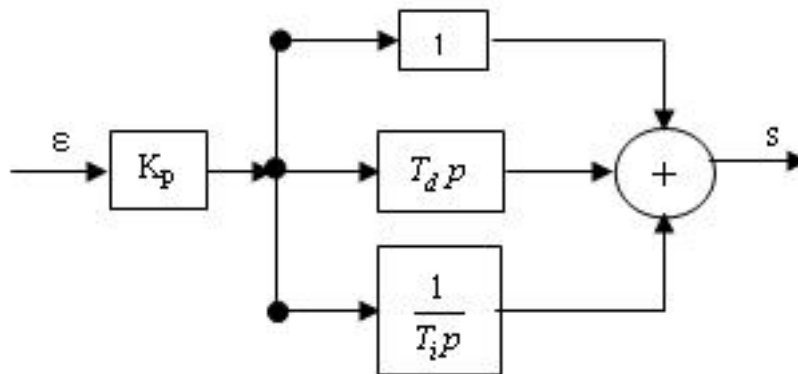


Figure II.3: Boucle de régulation PID en structure parallèle

### II.3.2.3. La structure mixte :

$$C(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$$



**Figure II.4 :** Boucle de régulation PID en structure mixte

### II.3.3. Réglage de PID :

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients  $K_p$ ,  $T_d$  et  $T_i$  afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être stable, rapide et précis, pour avoir une idée sur ces critères ; on peut les définir comme :

- **Stabilité :** c'est impérative.
- **Rapidité:** elle caractérise la facilité du système à réagir aux variations rapides du système. Lié à la bande passante du système.
- **Précision :** elle donnée par la valeur de l'erreur en régime établi.

Augmentation de	Stabilité	Précision	Rapidité
$K_p$	diminue	augmente	augmente
$T_i$	augmente	pas d'influence	diminue
$T_d$	diminue	pas d'influence	augmente

**Tableau II.1:** Tableau pour les 3 critères de régulation



## II.3.4. Les méthodes de réglage de PID :

### II.3.4.1. Ziegler-Nichols :

La méthode de Ziegler–Nichols est une méthode heuristique de réglage d'un régulateur PID. Elle a été développée en 1942 par John G. Ziegler et Nathaniel B. Nichols, ils sont deux ingénieurs américains de contrôle, le premier est né le 21 août 1909 et il est décédé le 9 décembre 1997, et le deuxième est né en 1914 et il est décédé en avril 1997.



**Figure II.5:** John G. Ziegler et Nathaniel B. Nichols

Cette méthode est divisée en soi même à deux sous-méthodes basées sur leur expérience et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres  $K_p$ ,  $T_i$  et  $T_d$  des régulateurs P, PI, et PID.

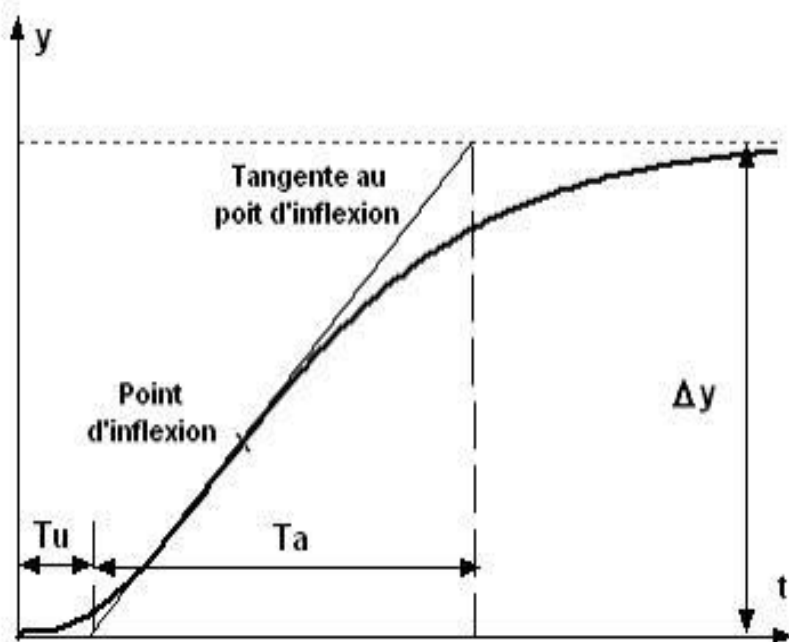
La première et avant de commencer, on doit déterminer le point critique premièrement, et pour cela, on annule l'action intégrale et l'action dérivée et on va boucler le processus sur un simple régulateur proportionnel. L'action proportionnelle est augmentée jusqu'à amener le signal en sortie de la boucle fermée oscille de manière entretenue et permanente, après avoir relevé le gain critique  $K_c$  du régulateur et la période d'oscillation  $T_c$  de la réponse.

Et pour déterminer les autres paramètres on utilise le tableau suivant :

Type de régulateur	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_c$	-	-
PI	$0.4 K_c$	$0.8 T_c$	-
PID	$0.6 K_c$	$0.5 T_c$	$0.125 T_c$

**Tableau II.2:** Tableau des paramètres des régulateurs P, PI, PID

La deuxième sous-méthode basée sur les deux paramètres  $T_u$  et  $T_a$  de la réponse indicielle résultants d'un essai en boucle ouverte. Pour cela on doit enregistrer la réponse indicielle du processus seul (régulateur PID) pour avoir ses paramètres ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ).



**Figure II.6 :** La réponse indicielle en B.O

Et après ça on utilise le tableau suivant pour déterminer les paramètres de régulateur :

Type de régulateur	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T_a/(T_u.k)$	-	-
PI	$0.9 T_a/(T_u.k)$	$3.3 T_u$	-
PID	$1.2 T_a/(T_u.k)$	$2 T_u$	$0.5 T_u$

**Tableau II.3:** paramètres de régulateur obtenus par Ziegler –Nichols en B.O

Avec **k** le gain statique :  $k= \Delta y/ \Delta U$

***Remarque:** La méthode de Ziegler-Nichols est la plus utilisée dans le domaine de régulation pour le réglage des régulateurs PID, mais elle crée un dépassement important, ce qui peut déstabiliser le système.*

#### II.3.4.2. Méthode analytique empirique :

C'est une méthode analytique parmi plusieurs, qui offre des formules de calcul des paramètres du régulateur de type PI ou PID, cette méthode étant de la famille des méthodes analytiques, est plus précise et offre de plus meilleurs performances que les méthodes empiriques comme la méthode de Ziegler-Nichols, car les méthodes analytiques garantissent le respect d'un cahier de charge, ce n'est pas le cas des méthodes empiriques.

Pour un système donné sous le modèle de Broida :

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{1 + Ts}$$

Un cahier de charge à imposer sous forme d'un temps de réponse pour un modèle de premier ordre avec une constante de temps  $\tau_m$ . Les règles empiriques de réglages pour un PI et un PID sont :

$$K_p = \frac{T + 0.5\theta}{K\tau_m} \quad \text{avec } t_r = 2,2\tau_m \quad T_i = \max(T, 0.5\theta) \quad T_d = \min(T, 0.5\theta) \text{ ou } T_i \geq 4T_d$$

#### **II.4. Conclusion**

Deux différentes méthodes de réglage d'un PI et d'un PID ont été présentées dans ce chapitre, l'une empirique classique celle de Ziegler-Nichols et l'autre empirique analytique, une comparaison sera faite dans le chapitre des simulations entre ces deux méthodes, en point de vue performances et efficacité.

# **CHAPITRE III**

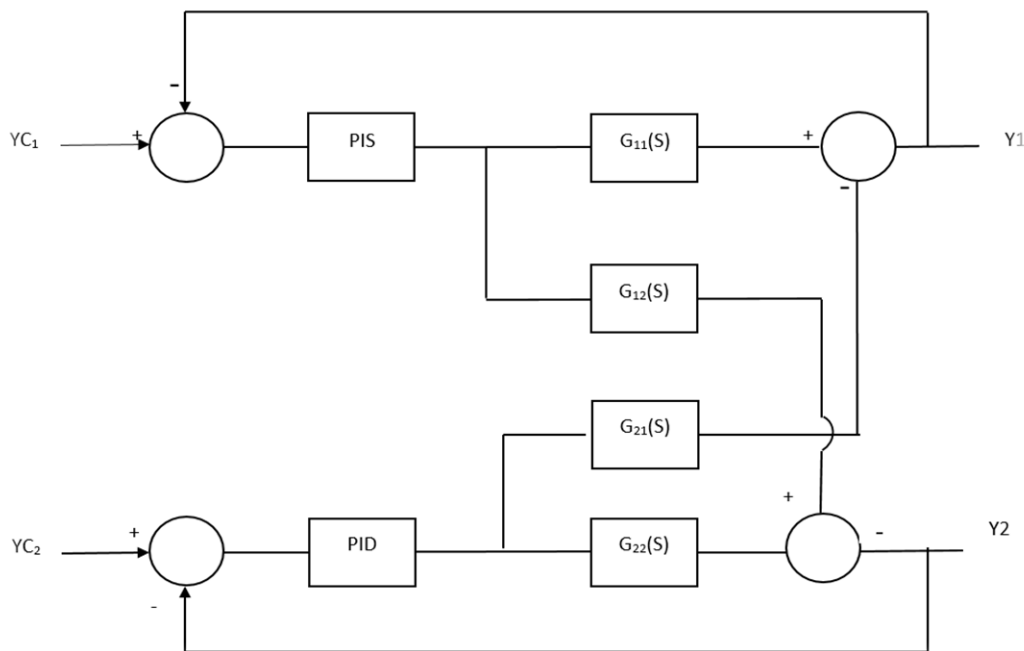
## **Simulations et résultats**

### III.1. Introduction:

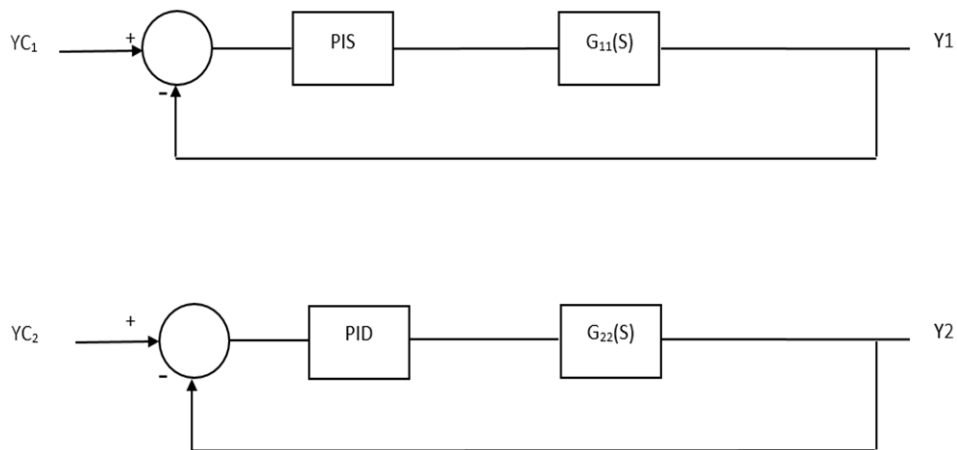
Afin de développer et d'implémenter les trois types de régulateurs présentés dans le chapitre précédent, un modèle multi variable de l'échangeur avec deux entrées (des tensions électriques) et deux sorties (températures  $T_1$  et  $T_4$ ) a été identifié, il est donné sous forme de matrice de transfert. Soit la matrice de transfert de l'échangeur thermique :

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{30e^{-26s}}{400s+1} & \frac{-5e^{-25s}}{50s+1} \\ \frac{19e^{-60s}}{450s+1} & \frac{9,8e^{-25s}}{400s+1} \end{bmatrix}$$

Le calcul de la matrice d'interactions la RGA a montré que le système est faiblement couplé, ce qui suggère l'utilisation de l'architecture décentralisée pour réguler les deux sorties du système, cette architecture nous permet d'ignorer les couplages entre les deux entrées et les deux sorties du système et ne considérer que les chaînes directes  $u_1 \rightarrow y_1$  et  $u_2 \rightarrow y_2$  dans la synthèse des régulateurs, ce qui la rend facile parce qu'elle est pour les deux sous-systèmes mono variables  $G_{11}(s)$  et  $G_{22}(s)$ .



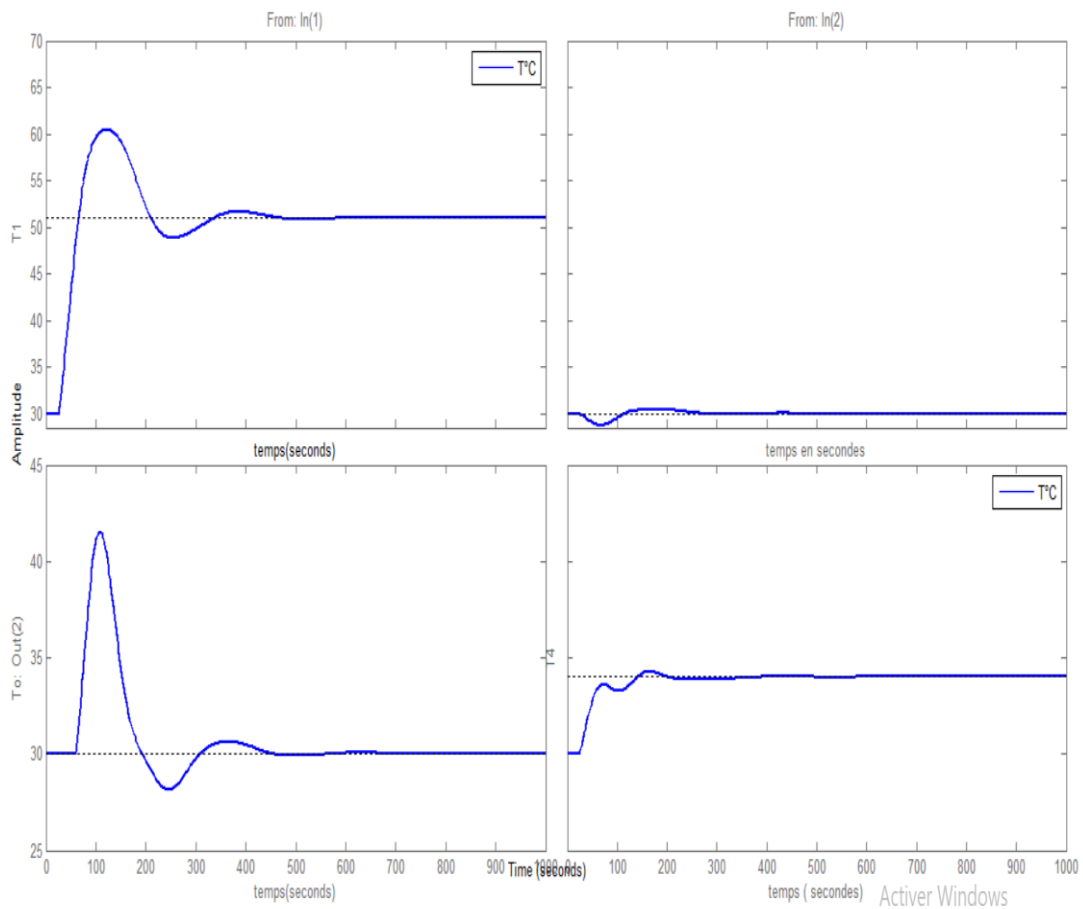
**Figure III.1 :** Schéma réel d'implantation d'une architecture décentralisée.



**Figure III.2 :** Schéma de synthèse d'une architecture décentralisée.

### III.2. Calcul des régulateurs :

#### III.2.1. La méthode de Ziegler-Nichols du régulateur PI :



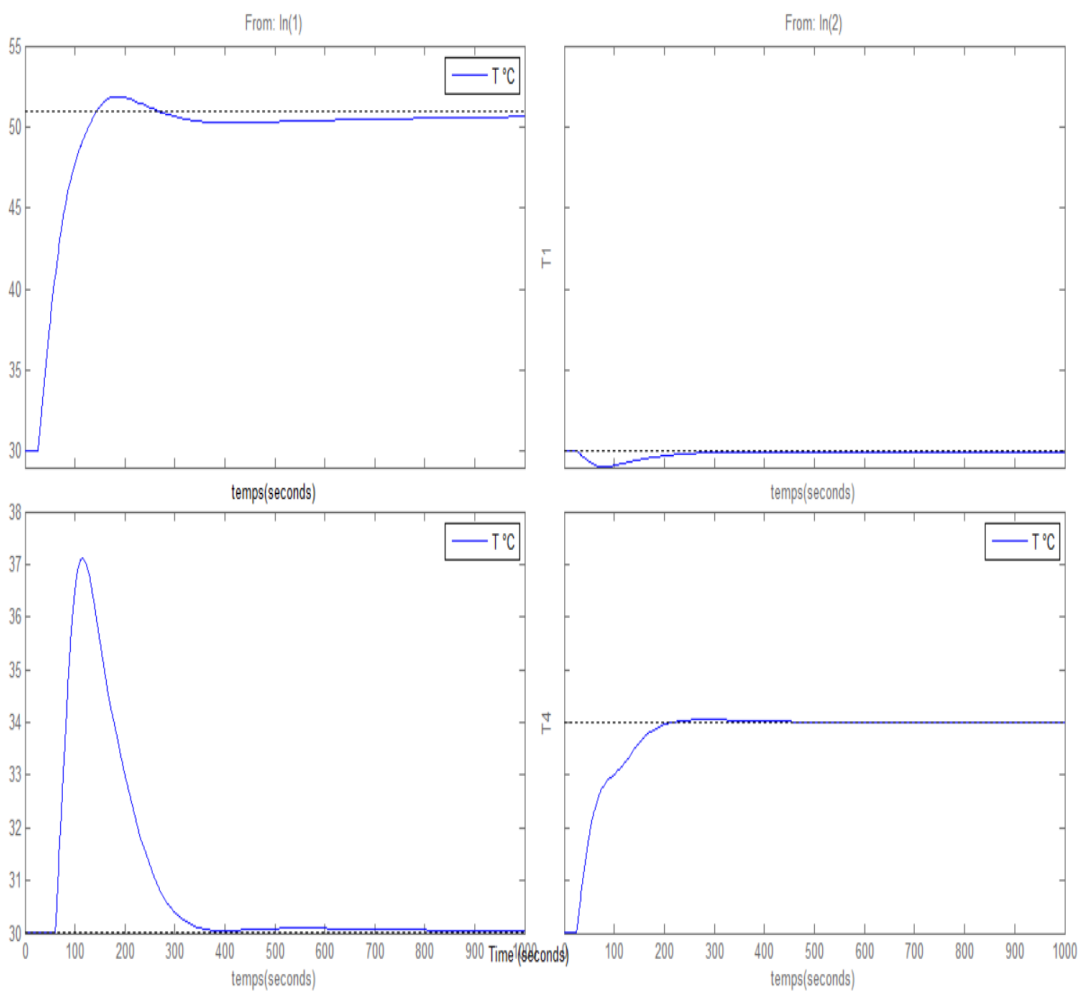
**Figure III.3 :** Réponses des sorties en chaînes directes et de leurs interactions.

**Commentaires :**

On constate une réponse avec un dépassement important de 17% mais acceptable <20% pour la température  $T_1$  mais pas pour la température  $T_4$  par ce que elle est plus lente que la réponse de  $T_1$ .

Pour les interactions on remarque un bon découplage pour  $G_{12}(s)$  par rapport à  $G_{21}(s)$  (Après 400s).

**III.2.2. La méthode empirique du régulateur PI :**



**Figure III.4 :** Réponses des sorties en chaines directes et de leurs interactions.

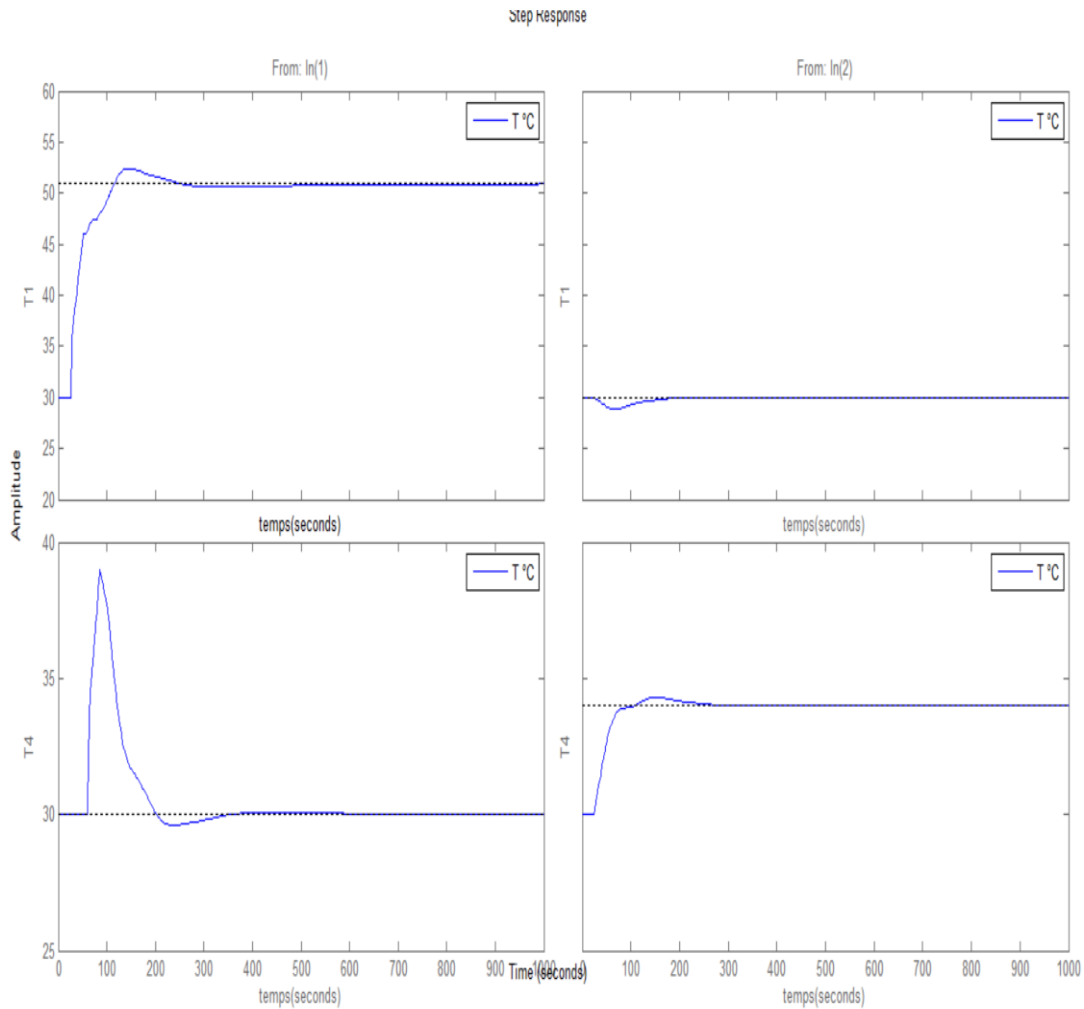
**Commentaires :**

On constate un dépassant très faible et performant (< 5%) pour la température  $T_1$  malgré quelle est plus rapide  $t_r=100s$  que celle de Ziegler-Nichols  $t_r=110s$ , pour la réponse de la température  $T_4$  elle s'est améliorée par rapport à celle de Ziegler-Nichols.



Les interactions sont gérées de la même façon que la méthode Ziegler-Nichols (après 300s).

### III.2.3. La méthode empirique du régulateur PID :



**Figure III.5 :** Réponses des sorties en chaînes directes et de leurs interactions.

#### Commentaires :

Pour la température  $T_1$  on constate une petite augmentation de dépassement par rapport au PI mais toujours performant ( $< 5\%$ ), néanmoins la réponse est plus rapide  $t_r = 90s$  que pour le PI. Le découplage de  $G_{12}(s)$  se fait plus rapidement qu'avec celui de PI et de Ziegler-Nichols (Après 200s).

### III.3. Rejet des perturbations d'échelon:

#### III.3.1. La méthode de Ziegler-Nichols :

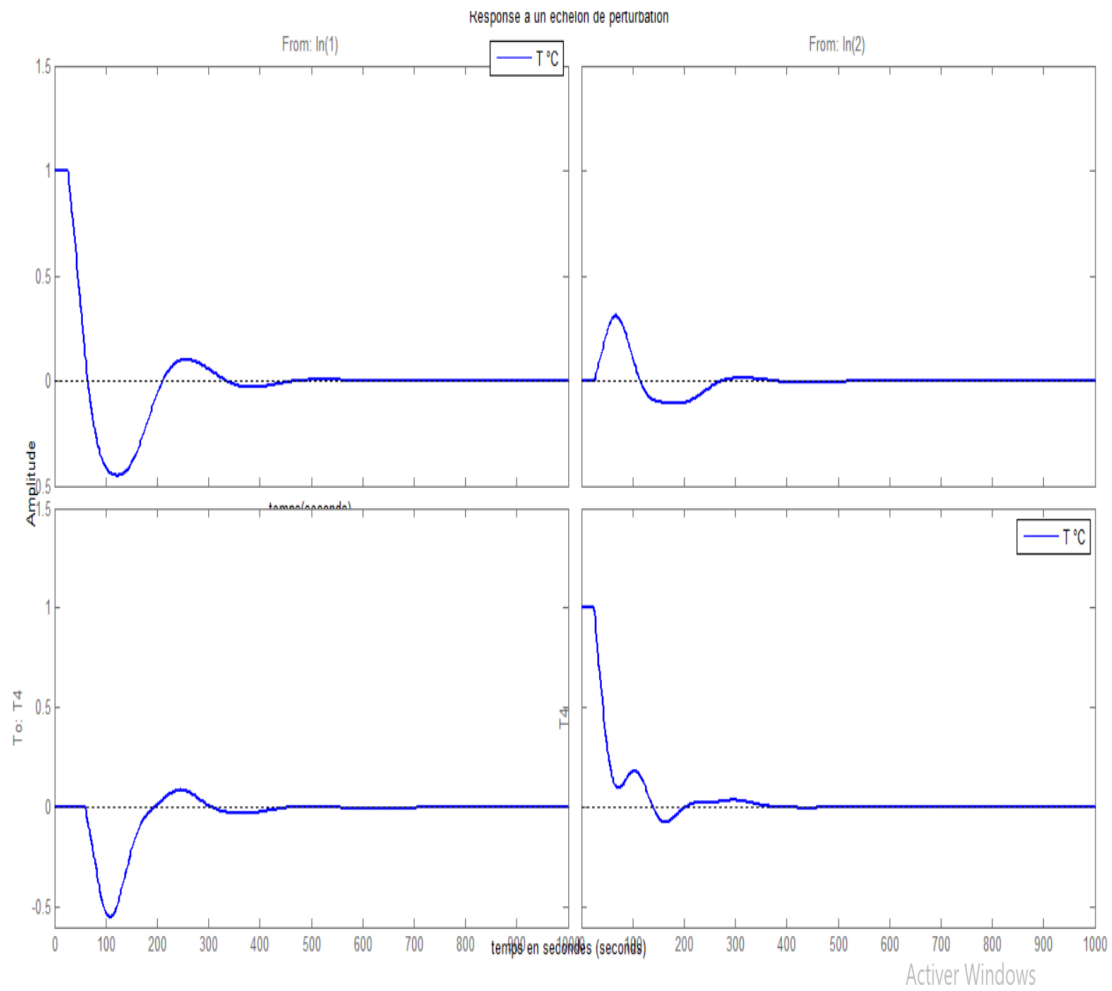


Figure III.6 : Rejet des perturbations d'échelon pour Ziegler-Nichols.

### III.3.2. La méthode empirique en PI:

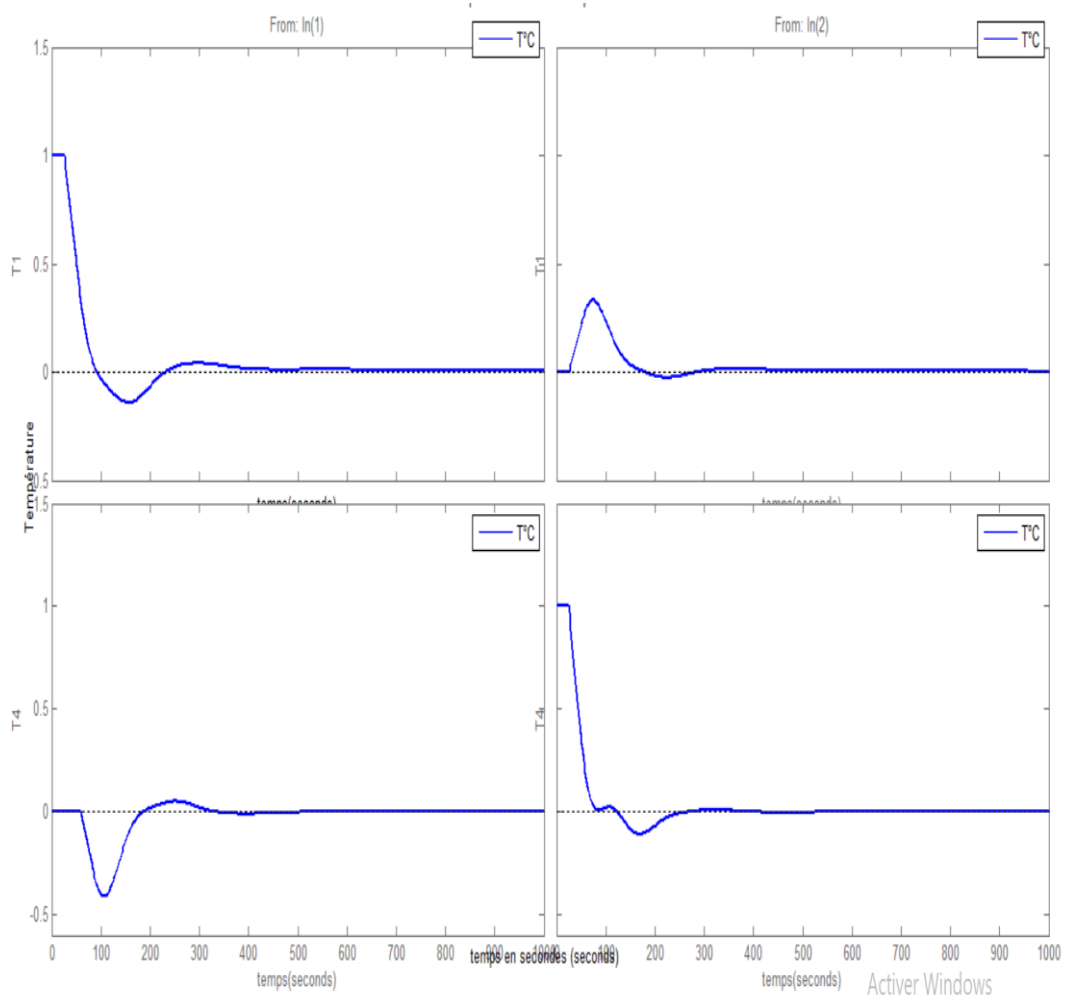
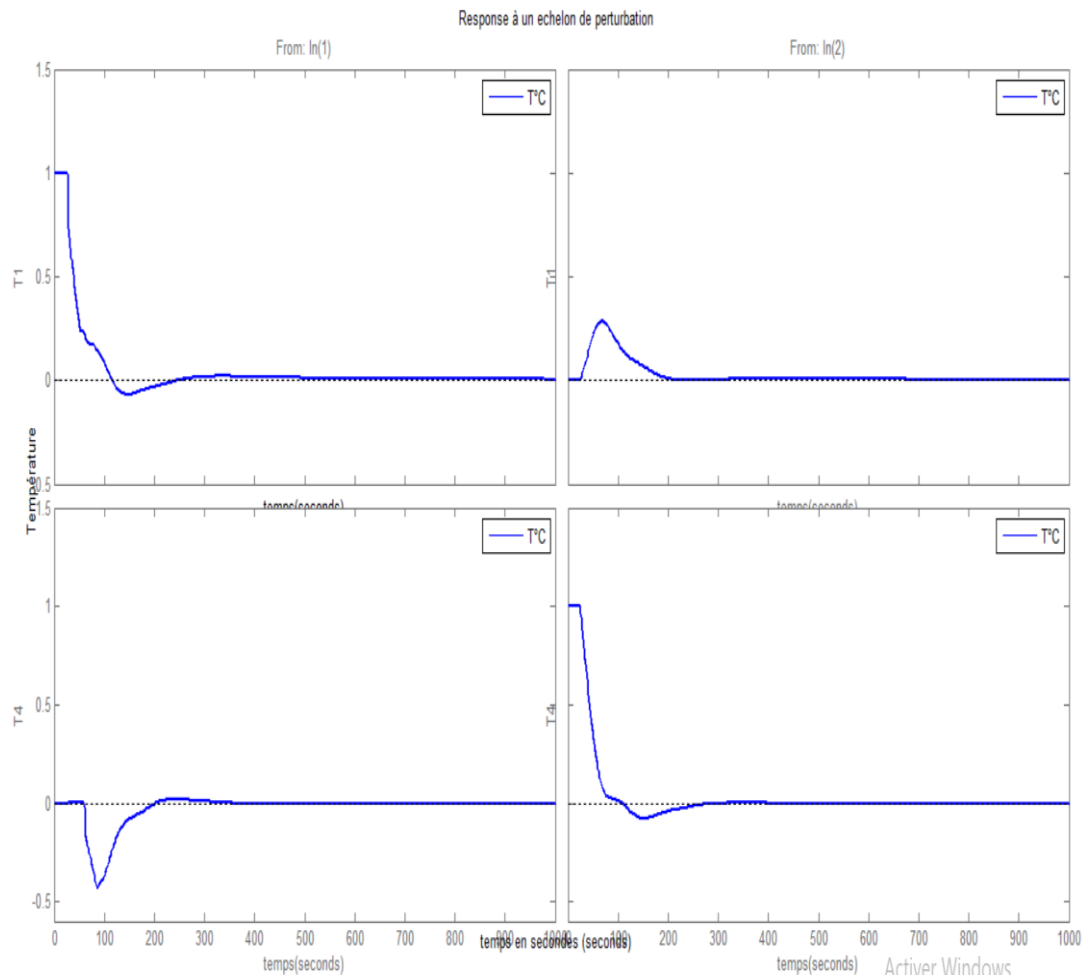


Figure III.7: Rejet des perturbations d'échelon pour la méthode empirique en PI.

### III.3.3. La méthode empirique en PID:



**Figure III.8:** Rejet des perturbations d'échelon pour la méthode empirique en PID.

#### Commentaires :

Le rejet des perturbations d'échelon pour le régulateur PID est le plus rapide

### **III.3. Conclusion**

Les résultats des simulations présentés dans ce chapitre, montre la réussite de la stratégie de l'architecture décentralisée pour la régulation des deux sorties du système. Les régulateurs PI et PID de la méthode empirique sont plus performants que le PI de la méthode de Ziegler-Nichols, le meilleur parmi les trois est le PID empirique.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Le développement d'un système de régulation automatique implique, en premier lieu, la connaissance du modèle mathématique qui découle de son comportement dynamique. Concernant les systèmes difficiles à modéliser, plusieurs méthodes sont disponibles pour identifier les paramètres du correcteur PID, ces méthodes peuvent fournir un intervalle tolérable des paramètres, il reste à l'opérateur de les bien ajuster selon ses connaissances sur l'effet de chaque paramètres sur les performances du système et suivant les données requises du cahier de charges.

Dans ce travail nous avons développé deux méthodes de réglage de PI et PID en utilisant le modèle du système avec une architecture décentralisée pour la régulation des températures de sorties d'un prototype d'échangeur thermique multi-variable avec deux entrées et deux sorties.

La méthode de réglage empirique classique de Ziegler-Nichols du PI ou PID à montrer son efficacité mais avec une limitation des performances surtout face à un système multi-variable qui malgré son faible couplage représente toujours un challenge pour des régulateurs mono-variables, à leur opposé les régulateurs de la méthode empirique analytique, arrive à gérer mieux les interactions du système en obtenant des performances plus meilleurs avec un respect du cahier de charge.

Comme perspective, nous proposons le développement d'un régulateur PI ou PID multi-variable, en utilisant le modèle du système avec une architecture centralisée.

## **REFERENCES**



## REFERENCES

- [1] Montserrat Gil-Martinez, Javier Rico-Azagra (2009) A course on MIMO time delay process control from practice. IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. 8p
- [2] Feedback Instruments Limited. Process Control. [www.fbk.com](http://www.fbk.com).
- [3] Article régulation Laboratoire des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique.
- [4] Mémoire de fin d'études de master « Implémentation et test en temps réel d'un bloc régulateur RST sur Le procédé industriel de régulation CE177 » -Hamaloui Ahmed Abd Erraouf – juin 2017.
- [5] [http://www.isetn.rnu.tn/ Régulation Industrielle L2 S2.pdf](http://www.isetn.rnu.tn/Régulation%20Industrielle%20L2%20S2.pdf).
- [6] Mémoire de fin d'étude en « régulation automatique »- Kadri Ahmed Yacine- 2013-2014.
- [7] Cours de Régulation Automatique d'Université Kasdi Merbah – Ouargla Faculté des Hydrocarbures et des Energies Renouvelables et Science de la Terre et de l'Univers - Département de Forage et Mécanique des Chantiers Pétroliers / Dr. HACHANA OUSSAMA.
- [8] <https://boowiki.info/art/les-echangeurs-de-chaleur/l-echangeur-de-chaleur.html>
- [9] Ajustage des Paramètres d'un Régulateur PID/ Professeur F. Mudry / mars 2006