

# LA REGULATION INDUSTRIELLE DES ECHANGEURS DE CHALEUR CALCUL ET DIMENSIONNEMENT

**S.GOURARI**

Département de Génie mécanique, Université de Skikda, Algérie  
Sim\_bad97@yahoo.fr

## RESUME

La majorité des processus industriels nécessitent de contrôler un certain nombre de paramètres: température, pression, niveau, débit, pH, concentration d'oxygène, etc. Il appartient à la chaîne de régulation (et plus généralement à la chaîne d'asservissement) de maintenir à des niveaux prédéterminés les paramètres qui régissent le fonctionnement du processus. L'objectif de ce travail est l'étude de la régulation industrielle d'un échangeurs de chaleur à faisceau et calandre ou circulent deux fluides(vapeur, eau), puis faire le calcul thermique et hydraulique qui a pour but le dimensionnement d'un échangeur de chaleur, en adoptant la méthode de KERN , afin de rechercher un coefficient d'échange global élevé pour une puissance thermique donnée avec le minimum de perte de charge.

**MOTS CLES :** régulation, consigne, perturbations, régulateur, boucles.

## 1 INTRODUCTION

Un automatisme bien pensé, surtout si son étude intervient en amont de la conception des unités de production, aura une implication économique importante. L'automatisme et la régulation des équipements thermiques tels que les fours, étuves, enceintes climatiques, chaudières... s'inscrit bien dans ce cadre. La régulation des procédés thermiques regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler (température, vitesse, pression,...) égale à une valeur désirée, appelée consigne, sans intervention humaine. Lorsque des perturbations ou des changements de consigne se produisent, la régulation provoque une action correctrice sur une grandeur physique du procédé, appelée grandeur réglante (ou commande)[1].

Toute chaîne de régulation (ou d'asservissement) comprend trois maillons indispensables : l'organe de mesure, l'organe de régulation et l'organe de contrôle. Il faut donc commencer par mesurer les principales grandeurs servant à contrôler le processus. L'organe de régulation récupère ces mesures et les compare aux valeurs souhaitées, plus communément appelées valeurs de consigne. En cas de non-concordance des valeurs de mesure et des valeurs de consigne, l'organe de régulation envoie un signal de commande à l'organe de contrôle (vanne, moteur, etc.), afin que celui-ci agisse sur le processus. Les paramètres qui régissent le processus sont ainsi stabilisés en permanence à des niveaux souhaités[2].

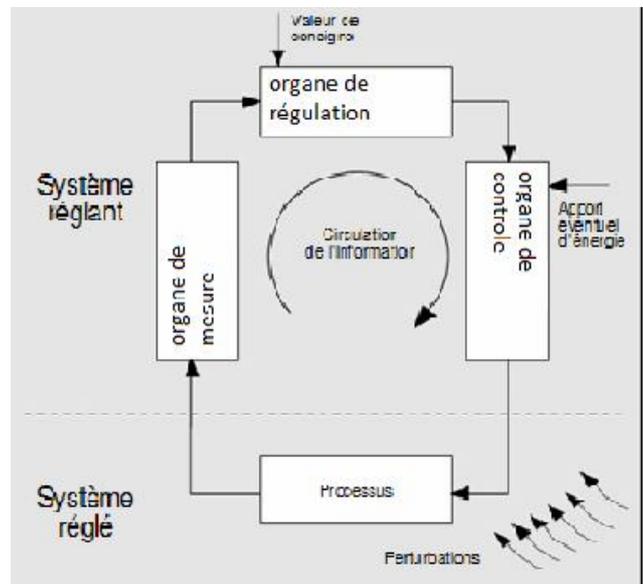


Figure 1: Régulation en boucle fermée

## 2 LA REGULATION EN BOUCLE FERMEE

Dans ce qui vient d'être dit, la variable de sortie (de la chaîne de régulation), ou grandeur réglante, exerce une influence sur la valeur de la variable d'entrée (de la chaîne de régulation) ou variable contrôlée, pour la maintenir dans des limites définies : il s'agit d'une régulation ou

d'un asservissement en boucle fermée. L'action de la grandeur réglante sur la variable contrôlée s'opère à travers le "processus" qui boucle la chaîne.

Dans une régulation en boucle fermée, une bonne partie des facteurs perturbateurs, y compris les dérives propres de certains composants de la boucle, sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé [3]. Autre avantage, il n'est pas nécessaire de connaître avec précision les lois, le comportement des différents composants de la boucle, et notamment du processus, bien que la connaissance des allures statistiques et dynamiques des divers phénomènes rencontrés soit utile pour le choix des composants.

Parmi les inconvénients d'une régulation en boucle fermée, il faut citer le fait que la précision et la fidélité de la régulation dépendent de la fidélité et de la précision sur les valeurs mesurées et sur la consigne [4].

Autre inconvénient, sans doute plus important, le comportement dynamique de la boucle dépend des caractéristiques des différents composants de la boucle, et notamment du processus, dont on n'est pas maître ; un mauvais choix de certains composants peut amener la boucle à entrer en oscillation (phénomène du pompage).

Enfin, la régulation en boucle fermée n'anticipe pas. Pour que la régulation envoie une commande à l'organe de contrôle, il faut que les perturbations ou les éventuelles variations de la valeur de consigne se manifestent sur la sortie du processus : ceci peut exiger un délai parfois gênant.

### 3 LA REGULATION EN BOUCLE OUVERTE

Dans un asservissement en boucle ouverte, l'organe de contrôle ne réagit pas à travers le processus sur la grandeur mesurée (celle-ci n'est pas contrôlée). Une régulation en boucle ouverte ne peut être mise en œuvre que si l'on connaît la loi régissant le fonctionnement du processus (autrement dit, il faut connaître la corrélation entre la valeur mesurée et la grandeur réglante).

Contrairement à un asservissement en boucle fermée, un asservissement en boucle ouverte permet d'anticiper les phénomènes et d'obtenir des temps de réponse très courts. De plus, il n'y a pas de pompage à craindre (car il s'agit d'un système dynamiquement stable). Enfin, l'asservissement en boucle ouverte est la seule solution envisageable lorsqu'il n'y a pas de contrôle final possible.

Au niveau des inconvénients, la régulation en boucle ouverte impose de connaître la loi régissant le fonctionnement du processus, et il est très fréquent que l'on ne connaisse pas la loi en question.

Autre inconvénient sérieux, il n'y a aucun moyen de contrôler, à plus forte raison de compenser, les erreurs, les dérives, les accidents qui peuvent intervenir à l'intérieur de la boucle ; autrement dit, il n'y a pas de précision ni surtout de fidélité qui dépendent de la qualité intrinsèque des composants. Enfin, la régulation en boucle ouverte ne

compense pas les facteurs perturbateurs.

## 4 LES AUTRES FORMES DE REGULATION

Le but d'une chaîne de régulation est de contrôler un processus. On l'a dit, l'instrumentiste "subit" ce processus. Au niveau des organes de mesure et de contrôle, il n'a pas une très grande marge de manœuvre, car ces organes, dans une certaine mesure, s'imposent souvent d'eux-mêmes.

Il reste un domaine où son savoir-faire va s'exercer pleinement : c'est au niveau de l'organe de régulation. Bien entendu, les caractéristiques de cet organe vont dépendre du processus à contrôler, des perturbations à prendre en compte, des caractéristiques des organes de mesure et de contrôle [5].

Bien souvent, les systèmes de régulation comportent, au lieu des chaînes linéaires ouvertes ou fermées, des ensembles de boucles imbriquées dont tout ou partie peut induire des contre-réactions à travers le processus.

### 4.1 Régulation En Cascade

L'objectif d'une régulation en cascade est de minimiser les effets d'une ou de plusieurs grandeurs perturbatrices qui agissent soit sur la variable réglante, soit sur une grandeur intermédiaire se trouvant en amont de la variable à régler [6].

Ce type de régulation est intéressant lorsque l'on a affaire à des processus à longs temps de réponse. En effet, quand une perturbation se manifeste, il est nécessaire d'attendre que son influence se ressente au niveau de l'organe de mesure placé en sortie de chaîne. Si les temps de réponse sont longs, la correction n'intervient donc que tardivement, parfois avec la cause qui l'a produite et dont le sens s'est inversé, provoquant pompage, instabilité, etc.

Bien évidemment, la régulation en cascade n'apporte aucune amélioration si la grandeur perturbatrice se produit en aval de la mesure intermédiaire [7]. Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit beaucoup plus rapide que la boucle externe (Voir figure 3).

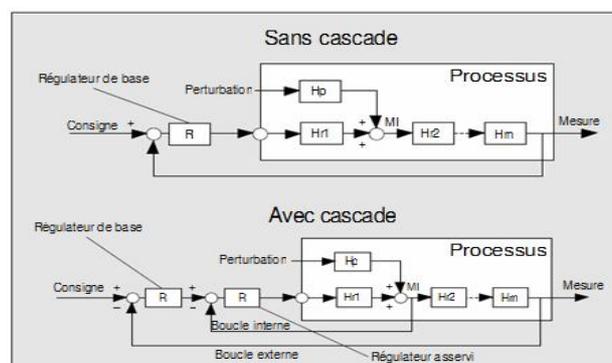


Figure 3: Régulation en cascades

#### 4.2 Régulation Mixte

Ce type de régulation est l'association d'une régulation en boucle fermée et d'une régulation en boucle ouverte. Les deux boucles sont complémentaires et elles associent leurs actions pour améliorer la stabilité globale. Ce type de régulation est à mettre en œuvre lorsqu'une perturbation affecte directement la grandeur à régler [8].

### 5 LES REGULATEURS PID

Un régulateur est le composant d'une chaîne de régulation ou d'asservissement dont la grandeur d'entrée est la différence algébrique, appelée écart, entre une grandeur contrôlée  $M(t)$  et une grandeur de consigne  $C$ . On a :

$$\varepsilon(t) = M(t) - C$$

Où  $\varepsilon(t)$  est l'écart.

Les régulateurs PID, faut-il le rappeler, est un sigle décrivant les trois actions de base du régulateur:

Proportionnelle, Intégrale et Dérivée. Il est important de connaître les effets de ces trois actions[9].

### 6 MISE EN EQUATIONS D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR

#### 6.1 Description

On considère le cas d'un échangeur thermique. Le système échange de l'énergie thermique entre de la vapeur circulant dans l'enceinte de l'échangeur et de l'eau circulant dans une tuyauterie qui serpente dans l'enceinte de l'échangeur, comme représenté sur la figure :

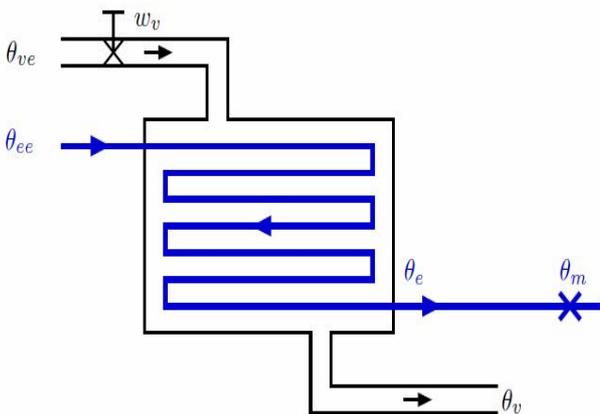


Figure7: schéma d'un échangeur de chaleur

La vapeur entre dans l'échangeur à la température  $\theta_{ve}$  et en sort à la température  $\theta_v$ . L'eau, quant à elle, entre à la température ambiante  $\theta_{ee}$  et ressort à la température  $\theta_e$ . Le débit de vapeur est réglé par une vanne placée dans le tuyau d'arrivée de vapeur[10].

#### 6.2 Régulation Cascade Mixte De La Température Et Du Débit D'un Echangeur De Chaleur

On s'intéresse à un échangeur de chaleur, composé de deux circuits appelés primaire et secondaire.

Dans le circuit primaire circule un débit de vapeur  $Q_1$  à la température  $\theta_1$  permettant de réchauffer l'eau du circuit secondaire dont la température d'entrée est notée  $T_1$  et la température de sortie  $T_2$ .

Le débit du circuit primaire  $Q_1$  est commandé grâce à une boucle de régulation, afin de pouvoir contrôler la température  $T_2$  en sortie du circuit secondaire de l'échangeur, indépendamment de la température  $T_1$  et du débit  $Q_2$  à l'entrée de ce circuit secondaire [8].

L'échangeur peut être considéré comme un système multi variable :

-à trois entrées :  $u_1(t)=Q_1(t)$  ;  $u_2(t)=T_1(t)$  et  $u_3(t)=Q_2(t)$ .

-une sortie :  $y(t)=T_2(t)$ .

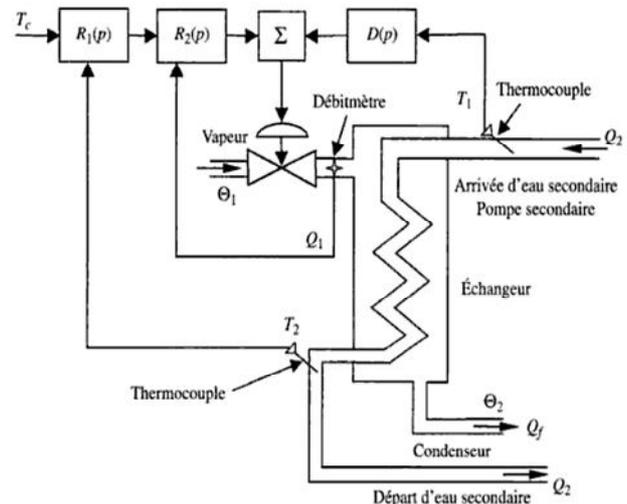


Figure9: Schéma de principe de l'échangeur de chaleur

D'après le schéma de principe de l'échangeur de chaleur donné par la figure-8-, le système étudié est pourvu de deux actionneurs et trois capteurs :

- une vanne papillon rotative pour le circuit primaire de vapeur.
- un servomoteur destiné à piloter la vanne d'admission de vapeur.
- un débitmètre pour la mesure du débit de vapeur du circuit primaire  $Q_1$ .
- deux thermocouples permettant la mesure de température  $T_1$  à l'entrée, et  $T_2$  en sortie du circuit secondaire où circule l'eau.

Le schéma fonctionnel de cette régulation est représenté par la figure (9). Il est caractérisé par les grandeurs suivantes :

$T_c$  : température de consigne.

$T_1$  et  $Q_2$  : grandeurs de perturbation sur l'échangeur de chaleur.

$T_2$  : température de sortie.

$R_2(p)$  : régulateur correspondant à la boucle de débit dont la sortie est  $Q_1$ .

$R_1(p)$  : régulateur de la boucle de température dont la sortie est  $T_2$ .

$D(p)$  : correcteur par anticipation pour diminuer l'effet des variations de la température  $T_1$ .

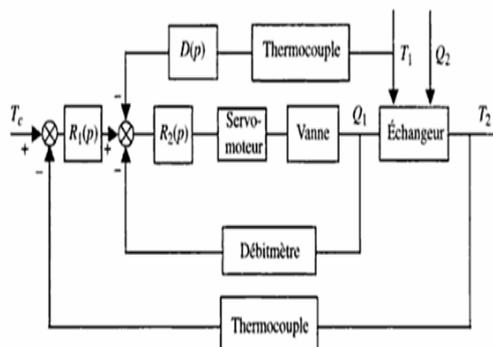


Figure10: schéma fonctionnel de la régulation cascade mixte globale

La température de sortie de l'eau est mesurée par un thermocouple placé à la sortie du circuit secondaire. Elle est retranchée à une valeur de consigne  $T_c$ , le signal d'erreur  $\varepsilon$  obtenu passe par le régulateur  $R_1(p)$ .

Un thermocouple placé en amont du circuit secondaire mesure la température d'entrée de l'eau  $T_1$ . Cette mesure passe par un correcteur qui agit par anticipation pour diminuer l'effet des variations de cette dernière [11].

Le régulateur  $R_2(p)$  a pour entrée ; le signal de sortie du régulateur  $R_1(p)$ , la mesure du débit prise par un débitmètre placé à la sortie d'une vanne menue d'un servomoteur et le signal de sortie du correcteur. Il délivre à sa sortie la grandeur de commande qui agit sur le servomoteur destiné à piloter la vanne d'admission de la vapeur, il est constitué d'un système électromécanique qui commande l'angle de rotation de la vanne.

## 7 CALCUL ET DIMENSIONNEMENT

Généralement les phases logiques de calcul à suivre sont :  
-introduction des propriétés physiques des fluides et des données géométriques du fonctionnement.

- calcul thermique et hydrauliques (pertes de charge).
- vérification.

Le programme de calcul mis au point est appliqué sur deux cas de conception d'échangeurs à faisceau et calandre le premier cas représente un échangeur de chaleur à disposition des tubes carrée, le deuxième représente un échangeur de chaleur à disposition des tubes triangulaire. À

chaque fois, on introduit les données de fonctionnement et les données géométriques concernant chaque application.

### 7.1 PREMIERE APPLICATION

Le programme de calcul mis au point pour le calcul est appliqué sur un échangeur de chaleur ayant pour fluides :

Fluide froid: naphthaline 48° API

$M_f = 12.97 \text{ Kg/s}$

$T_{f1} = 93.3 \text{ °C}$

$T_{f2} = 110 \text{ °C}$

$C_{p_f} = 2344 \text{ j/Kg °C}$

fluide chaud: l'huile de paille 35° API

$M_c = 3.75 \text{ Kg/s}$

$T_{c1} = 171.11 \text{ °C}$

$T_{c2} = 115.5 \text{ °C}$

$C_{p_c} = 2428.34 \text{ j/Kg °C}$

La pression admissible à l'intérieur et à l'extérieur des tubes est :

$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$

L'huile a tendance à laisser des dépôts de résidus, le facteur d'encrassement est :

$R_{ad} = 0.00088 \text{ m}^2 \text{ °C/W}$

- la naphthaline circule dans les tubes.
- l'huile de paille circule dans la calandre.

#### Données géométriques

- le diamètre extérieur des tubes  $d_e = 1.9 \text{ cm}$
- la longueur des tubes  $L = 487.68 \text{ cm}$
- 16 BWG
- la disposition des tubes carrée.

#### Résultats

$K = 500.59 \text{ W/ m}^2 \text{ °C}$	
$K_s = 410.35 \text{ W/ m}^2 \text{ °C}$	
$R = 0.00044 \text{ m}^2 \text{ °C/W}$	$R_{ad} = 0.00088 \text{ m}^2 \text{ °C/W}$
$DP_c = 35829.29 \text{ Pa}$	$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$
$DP_t = 14469.52 \text{ Pa}$	$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$

#### Discussion

Un échangeur avec les caractéristiques précédentes est disqualifié, car le facteur d'encrassement est trop petit.

Si on augmente le nombre de passes côté tubes, on remarquera que la vitesse massique va doubler ; ce qui va entraîner une perte de charge côté tube, beaucoup plus grande que la perte de charge admissible.

Alors, on va tout simplement réduire le coefficient d'échange sale, estimé au début.

on va prendre  $K_{s1} = 340.54 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ , pour un échangeur 1-2 (une passe côté calandre, deux passes côté tubes), avec un diamètre de calandre  $D_i = 43.81 \text{ cm}$ , 166 tubes et un espace entre chicanes égale à 8.89 cm.

En introduisant ces données, on aura les résultats suivants :

$K_s = 307.62 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	
$K = 424.54 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	
$R = 0.00088 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$R_{ad} = 0.00088 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
$DP_c = 32384.16 \text{ Pa}$	$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$
$DP_t = 14469.52 \text{ Pa}$	$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$

Toutes les conditions sont vérifiées :

- $K \square K_s$ .
- $R \square R_{ad}$ .
- $DP_c \square DP_{ad}$ .
- $DP_t \square DP_{ad}$ .

## 7.2 DEUXIEME APPLICATION

Fluide froid: l'eau

$M_f = 19.4 \text{ Kg/s}$ .

$T_{f1} = 48.8^\circ\text{C}$ .

$T_{f2} = 26.6^\circ\text{C}$ .

$C_{pf} = 4187 \text{ j/Kg }^\circ\text{C}$ .

### 7.2.1 Fluide chaud: solution de soude caustique

$M_c = 12.6 \text{ Kg/s}$ .

$T_{c1} = 87.7^\circ\text{C}$ .

$T_{c2} = 48.8^\circ\text{C}$ .

$C_{pc} = 3684.56 \text{ j/Kg }^\circ\text{C}$ .

$R = 0.00035 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

$DP_{ad} = 68904.23 \text{ Pa}$  pour le côté tube et le côté calandre.

L'eau circule dans les tubes.

la solution de soude caustique circule dans la calandre.

### Données géométriques

- le diamètre extérieur des tubes  $d_e = 2.54 \text{ cm}$ .
- la longueur des tubes  $L = 487.68 \text{ cm}$ .
- disposition des tubes triangulaire.
- échangeur 1-4 (une passe côté calandre, quatre passes côté tube).

### Résultats

$K_s = 1419.70 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	
$K = 2345.35 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	
$R = 0.00029 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$R_{ad} = 0.00035 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
$DP_c = 48232.96 \text{ Pa}$	$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$
$DP_t = 49611.04 \text{ Pa}$	$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$

### Discussion

On remarque d'après les résultats précédents que la condition sur le facteur d'encrassement n'est pas vérifiée ( $R \square R_{ad}$ ).

Le changement de la valeur de l'espacement entre chicanes n'est pas suffisant pour augmenter la valeur de R jusqu'à  $R_{ad}$ . on va donc, essayer un échangeur de chaleur ayant les caractéristiques suivantes :

- un diamètre de calandre  $D_i = 53.97 \text{ cm}$ .
- quatre passes côté tube.
- un espacement entre chicanes  $B = 15.24 \text{ cm}$  ; ce qui correspond à un nombre de tubes égale à 170 tubes.

En introduisant ces données dans le programme de calcul, on aura les résultats suivants :

$K_s = 1135.76 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	
$K = 2214.73 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	
$R = 0.00042 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$R_{ad} = 0.00035 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$
$DP_c = 67526.14 \text{ Pa}$	$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$
$DP_t = 33763.07 \text{ Pa}$	$DP_{ad} = 68902.48 \text{ Pa}$

Les conditions sont vérifiées :

- $K \square K_s$ .
- $R \square R_{ad}$ .
- $DP_c \square DP_{ad}$  (côté calandre).
- $DP_t \square DP_{ad}$  (côté tube).

Finalement l'échangeur dans le premier cas aura les caractéristiques géométriques suivantes :

#### ***Côté calandre***

$D_i = 43.81$  cm

Espacement entre chicanes  $B = 8.89$  cm

Nombre de passes = 1

Côté tube :

Nombre de tubes = 166

Longueur des tubes  $L = 487.68$  cm

$d_e = 1.9$  cm

16 BWG

$P = 2.54$  cm

Disposition des tubes carrée

Nombre de passes = 2

L'échangeur dans le deuxième cas aura les caractéristiques suivantes :

Côté calandre :

$D_i = 53.97$  cm

Espacement entre chicanes  $B = 15.24$  cm

Nombre de passes = 1

#### ***Côté tube***

$d_e = 2.54$  cm

14 BWG

$P = 3.175$  cm

Nombre de tubes = 170

Disposition des tubes triangulaire

Nombre de passes = 4.

## **8 CONCLUSION**

La modélisation des échangeurs de chaleur est complexe car on doit tenir compte de plusieurs paramètres tels que la géométrie de l'appareil et les propriétés de l'écoulement, ce qui rend la régulation de ces appareils délicate.

Le PID reste de loin la technique de régulation la plus répandue. Il donne en général satisfaction même après l'apparition des régulateurs numériques beaucoup plus sophistiqués que le PID.

## **REFERENCES**

- [1] : E. Godoy "Régulation industrielle". Technique et ingénierie. Dunod.
- [2] : J. Valance, J. Guinet, M. Feuillent "Le carnet du régulateur, mesure et régulation".
- [3] : D. Lequesne "Régulation PID analogie-numérique-floue".
- [4] : Vilbrandt & Dryden "Chemical Engineering Plant design" fourth edition.
- [5] : M. Ozisik "Basic heat transfer" Mc Graw Hill Book Company N.Y.
- [6] : M. Hazami, C. Kerkeni, A. Farhat, S. Kooli, F. Ben Jemaa et M. Maalej "étude expérimentale d'un échangeur thermique en polypropylène application au conditionnement des aquariums" INRST, BP 95, Hammam Lif, Tunisie.
- [7] : P. Pierson, D. Azilinson et J. Padet "Simulation du fonctionnement des échangeurs thermiques soumis à des conditions aux limites variables". Laboratoire de thermomécanique, faculté des sciences.
- [8] : P. Pierson, J. Padet, "Etude théorique et expérimentale des échangeurs en régime thermique instationnaire. Simulation d'une phase de relaxation." Int. J. Heat Mass Transfer 31 n°8(1988) 1577-1586.
- [9] : J. Padet "échangeurs thermiques méthodes globales de calcul avec 11 problèmes résolus". Masson.
- [10] : CH. BORY "énergétique (tome1), les échanges de chaleur par convection "(1ere partie), BORDAS MASSON 1968 Paris.
- [11] : Clina, "nouvelles méthodes de climatisation des hôtels et cités touristiques dans les pays méditerranéens par des nattes à tuyaux capillaires en matière plastique" Heiz- und Kühlelemente, Lübarser Strass 40-46, 13435, Berlin, Allemagne.