



ETUDE ET COMPARAISON DES METHODES DE CONTROL DANS LES SYSTEMES DE CLIMATISATION

Saher KOUMAYRA, Nazih MOUBAYED

Laboratoire d'Electrotechnique – ISAE – Université Libanaise
Bir Hassan, Beyrouth, Liban
Tél. : (961) 3 87 99 56; Email : nmoubayed@ieee.org

Résumé – Le thème abordé dans cet article s'intéresse aux problèmes de la climatisation dans des lieux fermés. Après présentations des différents systèmes de climatisation, l'étude est consacrée pour traiter le système AHU. Pour cela, les modèles des ses différentes parties sont présentés, puis des simulations des boucles d'asservissement de la température et de l'humidité sont discutées. Ces boucles d'asservissement ont été effectuées par des correcteurs PID, puis par des correcteurs à base de logique floue. Une comparaison entre les deux méthodes de contrôle est aussi illustrée.

Mots-clés : Régulation, automate programmable, logique floue, installation de climatisation, AHU.

1. INTRODUCTION

Malgré les progrès techniques, la plupart des installations de climatisation (HVAC = High Velocity Air Conditioner) ne sont pas très conformes, puisque la régulation de la température nécessite un facteur important qui est l'humidité. Malheureusement ce facteur est absent. Le but de cet article est de donner une nouvelle signification de régulation en s'intéressant à la technique de commande et de régulation numérique [1].

La technique des systèmes de climatisation est la technique de chauffage, de ventilation et de climatisation. Sous nos latitudes, tous les bâtiments doivent être chauffés, et, lorsque l'alimentation en eau chaude est réglée centralement, une puissance de chauffage doit être assurée aussi bien l'hiver que l'été. Des besoins et des nécessités spécifiques conditionnent quant à eux la ventilation ainsi que la climatisation de locaux et de bâtiments.

En effet, le chauffage consiste à maintenir à une certaine température une enceinte plongée dans une ambiance extérieure plus froide. La ventilation, seule ou combinée à un système de chauffage ou de climatisation, contrôle à la fois l'alimentation et l'évacuation de l'air à l'intérieur d'espaces fermés, afin d'éliminer les odeurs et de fournir suffisamment d'oxygène aux occupants. La climatisation contrôle l'environnement intérieur d'un espace, c'est-à-dire sa température, son humidité, la circulation de l'air et sa pureté, pour les occupants ou les matériaux industriels qui y sont manipulés ou stockés.

Tout d'abord, une revue sur les systèmes de climatisation est présentée dans le deuxième paragraphe. Une description du système AHU (Air Handling Unit) est traitée dans le troisième paragraphe. Ensuite, l'asservissement du système étudié est détaillé dans le quatrième paragraphe. Dans le cinquième paragraphe, nous présentons les modèles des différentes parties du système AHU. Dans le sixième paragraphe, les résultats de simulation sont analysés. De plus, le septième paragraphe traite l'asservissement du système AHU à base de la logique floue. Puis nous terminons l'article par une étude comparative et la conclusion.

2. LES SYSTEMES DE CLIMATISATIONS

Une revue générale sur les différents types des systèmes de climatisations est présentée. Tout d'abord, nous définissons le système AHU, suivit du système FCU (Fan Coil Unit). Ensuite, nous présentons le principe de la chaudière (Boiler) et nous discutons du principe du chauffage par le sol (Floor Heating).

2.1. Installations de climatisation avec apport central d'énergie (AHU)

Des installations de climatisation ayant une production centrale de chaleur et/ou de froid se distinguent selon que l'énergie de chauffage ou de refroidissement nécessaire dans la pièce soit transportée uniquement par l'air pulsé, uniquement via le réseau d'eau chaude ou d'eau froide ou par les deux sources d'énergie ensemble. De cette distinction résultent les trois variantes suivantes : systèmes à air seul, systèmes à eau seule, et systèmes à air/eau.

2.2. Appareil de climatisation compact (FCU)

Les appareils de climatisation compacts individuels sont utilisés pour la climatisation de l'air d'une pièce individuelle. Ils sont généralement installés directement dans la pièce concernée. Leur fonction principale est de fournir un refroidissement sensible de l'air ambiant. La déshumidification, le chauffage et le filtrage de l'air ne sont disponibles que dans une mesure limitée, et l'humidification n'est pas possible du tout.

2.3. Brûleurs (Boiler)

Il existe des brûleurs au mazout et au gaz.

– Brûleur à pulvérisation au mazout :

A haute pression, le mazout est pulvérisé en fines gouttelettes par les gicleurs. Il est ensuite mélangé à l'air de combustion.

– Brûleur pilote :

L'évaporation du mazout transforme en fait le brûleur au mazout en un brûleur au gaz, produisant une flamme bleue (brûleur pilote). Cela supprime le besoin de pulvérisation, augmente la qualité de la combustion et réduit les émissions polluantes (Co, CH, NOx).

2.4. Chauffage par le sol (Floor heating)

Il existe un grand nombre de systèmes différents de chauffage par le sol sur le marché. Selon le produit, les tuyaux sont disposés dans le sol en cercle ou en serpent. L'idée est de produire la température de surface la plus uniforme possible et si nécessaire, un chauffage plus fort sur les bords le long des murs extérieurs par une distance plus étroite entre les tuyaux. Les systèmes de chauffage par le sol fonctionnent généralement à de basses températures et peuvent ainsi être très économiques en étant commandés par des chaudières à basse température, des pompes à chaleur ou l'énergie solaire.

3. DESCRIPTION DU SYSTEME AHU ETUDIE

Le système étudié est le système AHU à air seul. Il s'agit de réguler la température dans une salle de 50 m de longueur et de 10 m de largeur. Pour aboutir à un confort thermique, le facteur d'humidité est introduit. Ce système utilise une vanne progressive (à commande proportionnelle) qui règle la proportion d'eau d'arrivée avec l'eau de retour. La régulation des conditions ambiantes à l'intérieur du bâtiment, à des fins industrielles, d'hygiène ou de confort est définie de la manière suivante :

Le chauffage consiste à maintenir à une certaine température la salle en étude, plongée dans une ambiance extérieure plus froide et à température variable. La ventilation, seule ou combinée à un système de chauffage ou de climatisation, contrôle à la fois l'alimentation et l'évacuation de l'air à l'intérieur de la salle, afin d'éliminer les odeurs et de fournir suffisamment d'oxygène aux occupants. La climatisation contrôle l'environnement intérieur de la salle, c'est-à-dire sa température, son humidité, la circulation de l'air et sa pureté. La régulation de la température est contrôlée par le débit d'eau qui entre dans les batteries chaudes ou froides. La régulation de l'humidité est contrôlée par le débit de vapeur qui entre dans l'humidificateur. La pureté de l'air est contrôlée en introduisant un filtre.

- En hiver, la batterie chaude est utilisée. Le système est placé à la température et l'humidité désirées (TC, HC). Par conséquent, le thermostat donne un ordre à la vanne de la batterie chaude d'ouvrir selon le besoin. Mais l'élévation de la température diminue l'humidité. Pour remédier à ce problème, la vanne de l'humidificateur fonctionne de façon à augmenter l'humidité de la salle jusqu'à l'humidité désirée.
- En été, une batterie froide est utilisée. Le système est placé à la température désirée. Ainsi, le thermostat donne un ordre à la vanne de la batterie froide d'ouvrir selon le besoin.

En effet, le schéma électrique du système ainsi que celui de son régulateur sont donnés sur la figure 1.

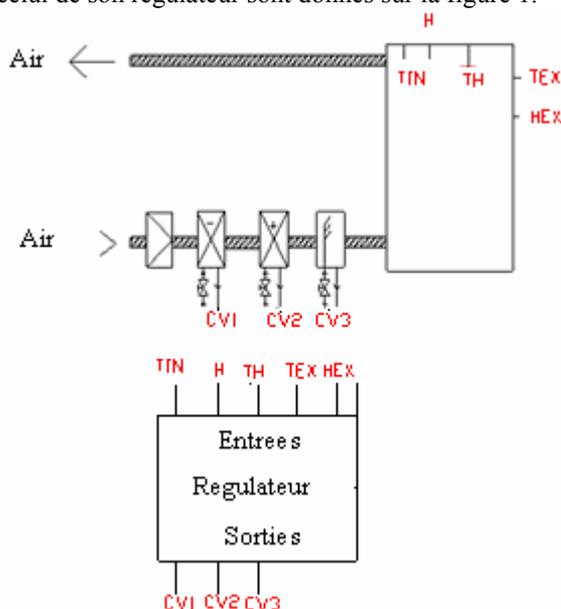


Figure 1. Le Système AHU étudié.

En plus, les capteurs et actionneurs utilisés sont définis de la façon suivante :

- La température extérieure (TE) est mesurée par une sonde au platine. Ses caractéristiques sont : 200 ohms à 0°C pour une variation de 0,4 ohm/°C.
- La température intérieure (TI) est mesurée par une thermistance (ou CTN). Ses caractéristiques sont : $R_0 = 10$ kohms à 0 °C, 16 kohms à -10 °C, 4 kohms à 20°C.
- TH (thermostat) indiquant la température ou l'humidité désirée.
- TIN capteur mesurant la température à l'intérieure de la salle.
- H capteur d'humidité à l'intérieure de la salle.
- HEX capteur d'humidité à l'extérieure de la salle.
- TEX capteur de température à l'extérieure de la salle.
- La vanne est commandée par un signal de courant allant de 4 à 20 mA.
- CV1, CV2 et CV3 sont les sorties du régulateur pour commander la batterie froide, la batterie chaude et l'humidificateur.

4. ASSERVISSEMENT DU SYSTEME ETUDIE

Le but d'un système asservi est d'annuler l'erreur qui apparaît entre l'entrée et la sortie : la sortie doit être égale à la valeur demandée, tout en rendant la réponse la plus rapide possible avec le minimum possible du dépassement. Le schéma bloc à réaliser est représenté sur la figure 2.

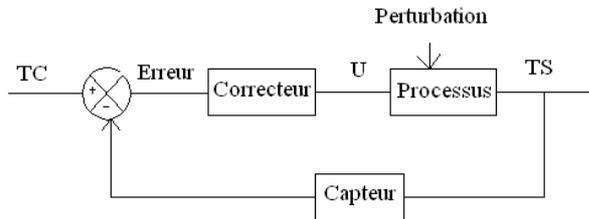


Figure 2. Schéma bloc du processus étudié.

En effet :

- TC : température de consigne
- TS : température de sortie
- correcteur : c'est un correcteur PID qui donne une commande au processus selon l'erreur.
- processus : c'est l'ensemble de vanne motorisée - échangeur.
- perturbation : c'est une variable qui perturbe le système.

Pour l'application utilisée, il est exigé que la température (puis l'humidité) de sortie soit égale chacune à celle de sa consigne et que les perturbations soient entièrement compensées.

5. MODELISATION DU SYSTEME AHU

5.1. Batteries chaude et froide

La batterie est le composant central des systèmes de climatisation classiques de type centrale de traitement d'air, ventilo - convertisseurs. La batterie est un échangeur de chaleur entre deux fluides, l'air (fluide secondaire) et généralement l'eau (fluide primaire). La batterie est constituée de plusieurs rangées de tubes reliés entre eux par des coudes afin de former des circuits de circulation de fluide. Le fluide primaire (eau) circule dans les tubes qui sont perpendiculaires à l'écoulement du fluide secondaire (air). Afin d'équilibrer les résistances thermiques côté air et côté eau, la surface d'échange côté air devra être augmentée à l'aide d'ailettes, donc :

$$Q_{\text{eau}} = Q_{\text{air}}$$

$$m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot |t_{\text{ce}} - t_{\text{es}}| = m_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} \cdot |t_{\text{ae}} - t_{\text{as}}|$$

Tout revient à déterminer la température de l'air à la sortie 't_{as}'. La figure 3 représente le symbole de la batterie chaude [2] et la figure 4 celui de la batterie froide [3].

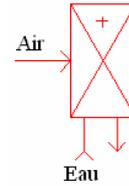


Figure 3. Batterie chaude.

avec :

$$m_{\text{eau}} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$m_{\text{air}} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$t_{\text{ce}} = \text{température d'eau à l'entrée} = 60 \text{ degrés.}$$

$$t_{\text{es}} = \text{température d'eau à la sortie} = 45 \text{ degrés.}$$

$$t_{\text{ae}} = \text{température d'air à l'entrée} = 16 \text{ degrés.}$$

$$c_{\text{air}} = \text{chaleur massique de l'air sec} = 1,006 \text{ kJ/kg.degrés.}$$

$$c_{\text{eau}} = \text{chaleur massique de l'eau} = 3,8 \text{ kJ/kg.degrés.}$$

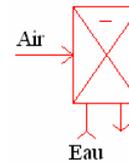


Figure 4. Batterie froide.

avec :

$$m_{\text{eau}} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$m_{\text{air}} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$t_{\text{ce}} = \text{température d'eau à l'entrée} = 6 \text{ degrés.}$$

$$t_{\text{es}} = \text{température d'eau à la sortie} = 20 \text{ degrés.}$$

$$t_{\text{ae}} = \text{température d'air à l'entrée} = 30 \text{ degrés.}$$

$$c_{\text{air}} = \text{chaleur massique de l'air sec} = 1,006 \text{ kJ/kg.degrés.}$$

$$c_{\text{eau}} = \text{chaleur massique de l'eau} = 3,8 \text{ kJ/kg.degrés.}$$

5.2. Vanne motorisée

La figure 5 montre le symbole de la vanne. La constante de cette vanne est $K_V = 0,5$.

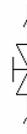


Figure 5. Vanne motorisée.

Le moteur est modélisé par la fonction de transfert

$$H = 0,5 / p.(1 + p).$$

5.3. La perturbation

C'est la variation de la température (ou de l'humidité) extérieure par rapport à la température (ou de l'humidité) intérieure.

La perturbation de la température est modélisée par une sinusoïde d'amplitude 2 degrés plus un échelon de 13 degrés en hiver et de 30 degrés en été et de pulsation $\omega = 2.\pi/10$.

Pour l'humidité, la perturbation est modélisée par une sinusoïde d'amplitude de 5 % plus un échelon de 60 % en hiver et de pulsation $\omega = 2.\pi/10$.

5.4. L'humidificateur [4]

Le symbole de l'humidificateur est donné sur la figure suivante :

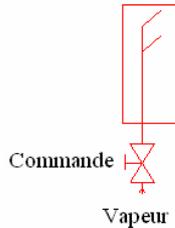


Figure 6 : L'Humidificateur.

En hiver, l'humidification est nécessaire, lors d'une forte demande d'air de l'extérieur, dans des secteurs industriels aussi divers que le textile, la photo, le tabac, le papier, les musées et les expositions d'art, etc..

L'humidification se fait soit par un humidificateur à vapeur soit par un humidificateur à évaporation.

Pour l'humidificateur à vapeur, l'eau est apportée à l'air déjà sous forme de vapeur. Par contre, l'humidification à évaporation nécessite une certaine chaleur latente d'évaporation, laquelle est enlevée au mélange d'air - vapeur.

Dans l'application utilisée, l'humidificateur à vapeur est exigé. Ses valeurs numériques sont les suivantes :

$$HR = P_{atm} * 100 * P_{vsat} / (\Delta_g + \omega_{ac}).$$

avec :

Pression atmosphérique = 101325 pa

$$P_{vsat} = 10^{(2,7877 + (7,625.T_{ac}) / (241,6 + T_{ac}))}.$$

T_{ac} = température d'air à l'entrée de l'humidificateur = 30 degrés.

$\Delta_g = 0,622$.

ω_{ac} = humidité absolue d'entrée = 0,005kg/kg.

5.5. La température intérieure (TI)

Le capteur de température intérieure est modélisé par un gain égal à 1.

6. RESULTATS DE SIMULATION

Après étude du système AHU, et de sa modélisation, nous procédons dans la suite à faire la régulation de la température, puis de l'humidité (figure 7).

Nous avons effectué cette régulation sur Matlab/Simulink moyennant le module CONTROL SYSTEM TOOLBOX.

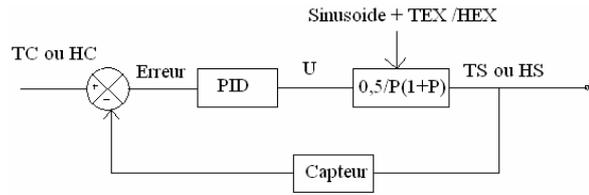


Figure 7. Schéma de régulation.

6.1. Régulation en hiver

La méthode de régulation utilisée est celle de Ziegler/Nichols. Au début, les actions Intégrale (I) et Dérivée (D) n'interviennent pas. Pour cela, nous augmentons le gain K_M jusqu'au moment où apparaît le régime oscillatoire périodique, ensuite nous relevons les paramètres suivants :

- K_M : valeur pour laquelle apparaît le régime oscillatoire périodique
- T_0 : période des oscillations, et nous trouvons :

K_p	K_I	K_D
$0,6.K_M$	$0,5.T_0$	$0,125.T_0$

Tableau 1. Paramètres du régulateur PID.

6.1.1. Réglage de la température

La figure 8 représente l'allure de la température en fonction du temps (en sec). Cette courbe suit celle de sa référence (échelon de température), ce qui signifie que la régulation a pris son effet.

Dépassement = 3,97 %

Temps de montée = 0,769 s.

Temps de réponse = 1,99 s.

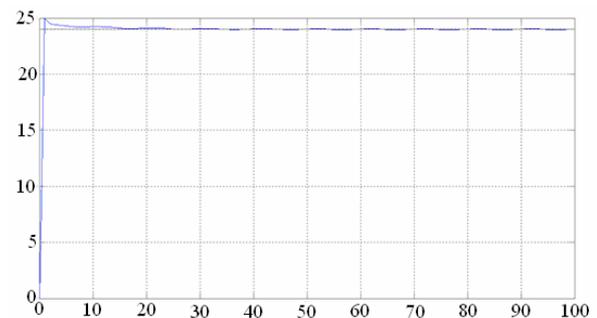


Figure 8. Courbe de réglage de la température.

6.1.2. Réglage de l'humidité

Dans ce cas, il est suffisant d'utiliser un régulateur proportionnel mais de valeur élevée. Soit $K_p = 1000$.

La figure 9 illustre l'influence de la régulation sur l'humidité en fonction du temps.

Par conséquent, la régulation de l'humidité présente un temps de réponse assez long (60 s), ceci est normal, car, sa constante de temps n'est pas assez faible vis-à-vis de celle de la température.

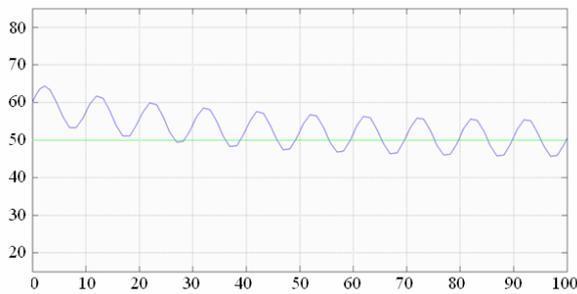


Figure 9. Influence de la régulation sur l'humidité.

6.2. Régulation en été :

La figure 10 représente l'allure de la température en fonction du temps (en sec) en été et cela après régulation. Nous remarquons qu'elle suit sa courbe de référence, ce qui signifie que la régulation a aussi pris son effet. La courbe nous donne :

Dépassement = 2,5 %,

Temps de montée = 0,78 s,

Temps de réponse = 1,95.

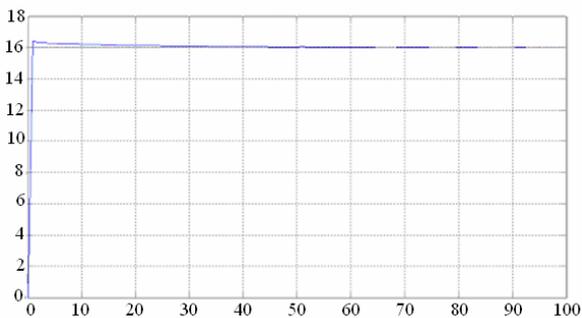


Figure 10. Température après régulation en été.

7. LOGIQUE FLOUE

Dans la suite, nous traitons la régulation de la température tout en utilisant la logique floue [5]. Dans le logiciel Matlab/Simulink, le module FUZZY LOGIC TOOLBOX permet de générer des blocs utilisant la logique floue.

La figure 11 présente le système étudié placé dans une boucle d'asservissement contenant un régulateur flou. Il a une structure identique à un système à réglage par retour classique (ou réglage par contre réaction d'état).

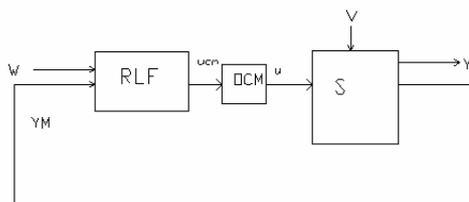


Figure 11. Schéma bloc de la régulation du système selon la logique floue

Il est constitué de:

- S : le système à régler,
 - OCM : l'organe de commande,
 - RLF : le régulateur par logique floue,
 - w : la grandeur de consigne,
 - u_{cm} : le signal de commande fourni par le RLF,
 - u : la grandeur de commande fournie par l'OCM,
 - v : une perturbation,
 - y : la grandeur à régler (ou sortie),
 - y_M: le vecteur qui contient les grandeurs mesurées.
- Ce dernier contient en général la grandeur à régler, et le cas échéant, d'autres grandeurs mesurées qui sont déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du système.

La figure 12 représente le schéma de régulation de la température en hiver tout en introduisant la logique floue.

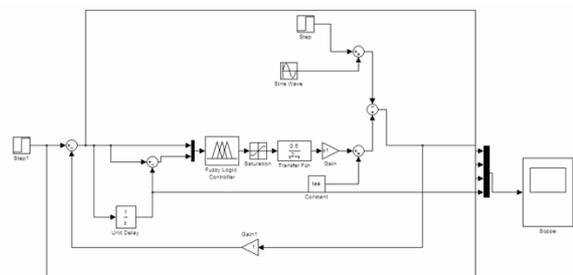


Figure 12. Régulation de la température en hiver en utilisant la logique floue.

Dans le schéma illustré sur la figure 12, l'opérateur retard (1/z) est un opérateur échantillonné. Sa sortie est mise à jour toutes les cinq secondes. Il permet de mémoriser la valeur de l'erreur à l'instant (t-1). Ainsi, le circuit de différence permet d'obtenir la variation de l'erreur entre deux instants d'échantillonnage. Le contrôleur sera donc sensible à l'erreur de la température et à sa variation.

Le contrôleur flou (Fuzzy Logic Controller) remplace le correcteur PID.

Pour construire ce régulateur flou, une définition des entrées et des sorties était nécessaire, pour cela nous prenons pour entrée 'erreur' (écart de température) et 'derreur' (la variation de l'erreur), et pour sortie la commande.

Ensuite, nous définissons les plages de variation (les ensembles flous) et les fonctions d'appartenance. Ceci est fait pour les entrées et pour la sortie.

Les fonctions d'appartenance utilisées sont de type trimf (triangulaires). Une fois le type de fonction d'appartenance choisie ainsi que la plage de variation, nous appelons chaque partie de la fonction d'appartenance par son nom significatif.

La fonction d'appartenance de l'entrée comporte trois parties : Chaud, OK, Froid. Celle de 'derreur' comporte trois parties : se réchauffe, constant, se

refroidit. Celle de la sortie est divisée en cinq parties : Refroidir beaucoup (RB), Refroidir (R), OK, Réchauffer (C), Réchauffer beaucoup.

Pour une simplification du traitement, les variables 'erreur' et 'derreur' sont normalisées au domaine [-1 +1], la variable de sortie [-3 +4].

Les règles d'action sur le procédé sont :

- Si l'erreur est se refroidit ET derreur est chaud ALORS la commande sera R,
- Si l'erreur est se refroidit ET derreur est OK ALORS la commande sera C,
- etc..

On résumera alors ces règles d'inférences dans le tableau suivant :

erreur/derreur	Chaud	OK	Froid
Se-refroidir	R	C	CB
constant	R	Rien	C
Se-réchauffer	RB	R	C

Tableau 2. Règles d'inférences.

Une fois le régulateur est configuré, les résultats de simulation apparaissent dans la figure Y. La courbe de la température présente un dépassement, mais sa rapidité n'est pas faible. De même, elle représente une erreur statique de un degré.

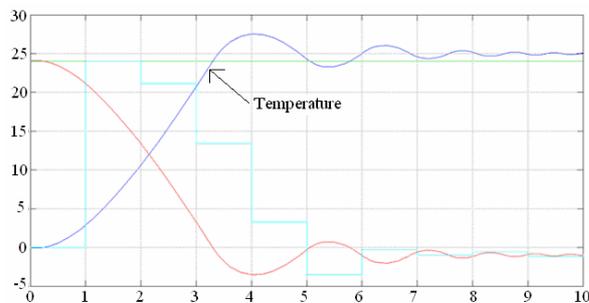


Figure 13. Résultats obtenus par la logique floue.

Si l'erreur est compris entre [-1 ; -0.5], donc 'erreur' est 50% chaud et 50% OK.

8. ETUDE COMPARATIVE

Des résultats obtenus dans les deux derniers paragraphes, la correction à base de la logique floue n'est pas favorable. En effet, le temps de réponse est grand, et l'erreur est important (figure 14). Par conséquent, les résultats obtenus par l'insertion d'un correcteur PID présente une réponse plus intéressante (figure 14).

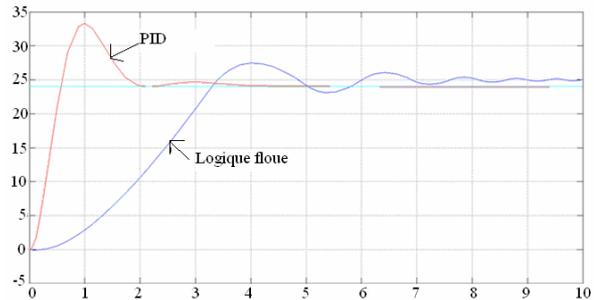


Figure 14. Résultats des courbes de température obtenues (PID et Logique floue).

9. CONCLUSION

La régulation de la température et de l'humidité est devenue un des facteurs essentiels dans la plupart des installations de climatisation. Le problème majeur est de trouver une régulation conforme de température et d'humidité tout en utilisant un système simple et facile à programmer. De cette façon, un opérateur non expert peut utiliser ce système, donc, il n'a à donner que les valeurs de la température et de l'humidité désirée au thermostat.

Dans cet article, les différents systèmes de climatisations ont été présentés. Nous nous sommes intéressés dans la suite à l'étude du système AHU. Pour cela, nous avons réalisé une régulation de la température et de l'humidité du système étudié. Cette étude a été suivie par une régulation de la température moyennant la logique floue. Les résultats de simulation ont montré que le régulateur PID donne le meilleur résultat car il a présenté un temps de réponse plus petit, et une erreur statique très petite. Par contre, le régulateur à base de la logique floue possède un système simple à réaliser mais il n'est pas conforme à cette application car il présente un temps de réponse élevé.

Références

- [1] Site Web : <http://www.ashrae.com>.
- [2] D. Maricho et O. Morisot, *Modélisation simplifiée d'une batterie chaude dans l'optique d'un calcul des consommations d'énergie*. Ecole des Mines de PARIS, Centre d'Energétique.
- [3] D. Maricho et O. Morisot, *Batterie Froide à Eau Glacée : modélisation simplifiée en régime permanent*. Ecole des Mines de PARIS, Centre d'Energétique..
- [4] D. Maricho et O. Morisot, *Humidificateur*. Ecole des Mines de PARIS, Centre d'Energétique.
- [5] Site Web : <http://www2.ac-lille.edu.fr>, Université des Sciences et Technologies de Lille.