

# وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2019

Faculté: Sciences de l'Ingénierat  
Département: Electronique

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé :  
**ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME  
DE RÉGULATION DE TEMPÉRATURE**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électronique

Spécialité: Instrumentation

Par :

**BOUMAZA Abd Errahmane**

### DEVANT LES JURYS

|                        |             |                    |            |
|------------------------|-------------|--------------------|------------|
| Président :            | M.FEZZARI   | Grade : Professeur | UBM Annaba |
| Directeur de mémoire : | S.BENSAOULA | Grade : MCA        | UBM Annaba |
| Examineur :            | R.HAMDI     | Grade : MCB        | UBM Annaba |
| Examineur :            | M. BOUATLBI | Grade : Professeur | UBM Annaba |

---

## الملخص:

تعتبر درجة الحرارة معلومة مهمة في الصناعة، فهي بمثابة حجر الأساس التي يجب أن تعرف قيمتها بدقة. من أجل الحصول على درجة حرارة دقيقة ، اختار المهندسون القياس الأوتوماتيكي.

يتضمن هذا المشروع التحكم في درجة حرارة الفرن الكهربائي وتنظيمه. إنه ينطوي على

تطوير نظام تحكم رقمي يعتمد على متحكم (PIC 16F877A) مرتبط بمستشعر درجة الحرارة (LM35DZ) ونظام تدفئة (فرن كهربائي) يرتبط بمقياس الجهد. يتم نقل الحسابات والتحويلات اللازمة إلى المتحكم

**الكلمات المفتاحية:** القياس الأوتوماتيكي ، التحكم في درجة الحرارة ، نظام التحكم الرقمي.

## **Résumé :**

La température constitue une information importante dans l'industrie, elle intervient comme une grandeur principale dont la valeur doit être connue avec précision. Afin d'avoir un résultat de température exacte, les ingénieurs ont opté pour la mesure automatique.

Ce projet consiste à commander et assurer la régulation de la température d'un four électrique. Il s'agit de développer un système de commande numérique basé sur un microcontrôleur PIC 16F877 associé à un capteur de température LM35z et à un système de chauffage (four électrique) associé à un potentiomètre. Les calculs et les conversions nécessaires sont confiés au microcontrôleur.

**Mots clé :** mesure automatique, la régulation de température, système de commande numérique.

**Abstract :**

Temperature is important information in the industry, it acts as a main magnitude whose value must be known with precision. In order to have an exact temperature result, the engineers opted for automatic measurement.

This project involves controlling and regulating the temperature of an electric oven. It involves developing a digital control system based on a PIC 16F877A microcontroller associated with a temperature sensor LM35DZ and a heating system (electric oven) associated with a potentiometer. The necessary calculations and conversions are entrusted to the microcontroller.

**Key words:** automatic measurement, temperature regulation, digital control system.

# Remerciements

*Avant tout je remercie Allah tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour élaborer ce modeste travail.*

*Au terme de ce modeste travail, il m'est agréable de pouvoir remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à le réaliser.*

*Ma profonde gratitude et vifs remerciements vont à mon encadreur Mr. Bensaoula pour sa disponibilité.*

*Ma reconnaissance va à tous les membres de jury qui nous feront l'honneur d'apprécier mon travail.*

*Tous les mots restent faibles pour exprimer ma profonde reconnaissance à mes parents pour le soutien et l'aide précieuse qu'ils m'ont apportés durant mes longues années d'études.*

# *Dédicaces*

*Je voudrais dédier cet humble travail :*

*À ma chère maman et mon cher père. Qui ont veillé à ce que je suis  
devenue maintenant.*

*À mes frères, mes sœurs.*

*À tout mes amis (es).*

# *Sommaire*

# Sommaire

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

## Partie théorique

### Chapitre I : Etat de l'art des fours électriques.

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Introduction.....   | 2  |
| 2   | Problématique.....  | 2  |
| 3   | Objectif.....   | 2  |
| 4   | Définition.....   | 2  |
| 5   | Les types des fours.....  | 2  |
| 5.1 | Four de cuisine.....  | 2  |
| 5.2 | Fours à microondes.....   | 3  |
| 5.3 | Fours solaires.....   | 3  |
| 5.4 | Four de poterie.....  | 3  |
| 5.5 | Four industriel.....  | 3  |
| 6   | Les fours électriques à résistance.....                               | 3  |
| 6.1 | Introduction.....   | 3  |
| 6.2 | Description.....  | 4  |
| 6.3 | Caractéristiques des fours à résistances.....                         | 5  |
| 6.4 | Différents types de fours électriques à résistances.....              | 5  |
| 7   | Les fours industriels.....  | 6  |
| 7.1 | Les fours de l'industrie sidérurgique.....                            | 6  |
| 7.2 | Les fours de cimenterie.....  | 7  |
| 7.3 | Les fours de l'industrie verrière.....                                | 8  |
| 7.4 | Les fours des industries céramiques et des produits réfractaires..... | 9  |
| 8   | Les capteurs de température.....                                      | 10 |
| 8.1 | Les sondes RTD (Resistance Temperature Detectors).....                | 10 |
| 8.2 | Thermistance.....   | 11 |
| 8.3 | Thermocouple.....   | 11 |
| 8.4 | Choix du capteur de température.....                                  | 12 |
| 8.5 | Le capteur de température LM35.....                                   | 13 |

### Chapitre II : La régulation.

|     |                                       |    |
|-----|---------------------------------------|----|
| 1   | Introduction.....                     | 15 |
| 2   | Système proposé.....                  | 15 |
| 2.1 | Le schéma synoptique.....             | 15 |
| 2.2 | Fonctions des différents modules..... | 16 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.2.1 | Le microcontrôleur .....                     | 16 |
| 2.2.2 | L'étage de puissance .....                   | 16 |
| 2.2.3 | Le four électrique .....                     | 16 |
| 2.2.4 | Le capteur.....                              | 16 |
| 2.2.5 | L'amplificateur.....                         | 16 |
| 2.2.6 | La consigne .....                            | 17 |
| 2.2.7 | Le microordinateur : PC.....                 | 17 |
| 3     | La régulation industrielle.....              | 17 |
| 3.1   | Le régulateur PID.....                       | 17 |
| 3.1.1 | Principe du correcteur PID .....             | 17 |
| 3.1.2 | Réglage d'un PID.....                        | 18 |
| 3.2   | Définitions .....                            | 19 |
| 3.2.1 | La stabilité.....                            | 19 |
| 3.2.2 | La rapidité.....                             | 19 |
| 3.2.3 | La précision.....                            | 19 |
| 3.3   | La régulation Tout Ou Rien à hystérésis..... | 21 |
| 4     | Le microcontrôleur 16F877A .....             | 22 |
| 4.1   | Les ports entrée/sortie.....                 | 22 |
| 4.2   | Le convertisseur analogique-numérique.....   | 23 |
| 4.3   | Les timers.....                              | 24 |

## **Partie pratique**

### **Chapitre III : Conception matérielle et programmation.**

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Introduction.....                          | 25 |
| 2   | Conception matérielle.....                 | 25 |
| 2.1 | Liaison PC-microcontrôleur .....           | 25 |
| 2.2 | Circuit d'alimentation.....                | 26 |
| 2.3 | Branche acquisition .....                  | 27 |
|     | a) Le capteur LM35DZ.....                  | 27 |
|     | b) L'amplificateur de tension.....         | 27 |
|     | c) La conversion analogique-numérique..... | 28 |
| 2.4 | Branche de commande .....                  | 28 |
| 2.5 | Afficheur LCD.....                         | 29 |
| 2.6 | La carte principale .....                  | 30 |
| 3   | Programmation .....                        | 30 |
| 3.1 | Organigramme principal.....                | 31 |

|     |                                   |    |
|-----|-----------------------------------|----|
| 3.2 | Configuration du pic 16f877A..... | 32 |
| 3.3 | Temporisation .....               | 33 |
| 3.4 | La consigne .....                 | 33 |
| 3.5 | Simulation.....                   | 33 |
| 4   | Conclusion .....                  | 35 |
|     | Conclusion générale .....         | 36 |
|     | Bibliographie.....                | 37 |

# Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 1.1</b> : Schéma de la chambre de résistance à chaleur indirecte ..... | 4  |
| <b>Figure 1.2</b> : Représentation schématique d'un four à résistance.....       | 5  |
| <b>Figure 1.3</b> : Four sidérurgique.....                                       | 6  |
| <b>Figure 1.4</b> : Four de cimenterie.....                                      | 7  |
| <b>Figure 1.5</b> : Four de l'industrie verrière.....                            | 8  |
| <b>Figure 1.6</b> : Four des industries céramiques.....                          | 9  |
| <b>Figure 1.7</b> : Sonde RTD.....   | 11 |
| <b>Figure 1.8</b> : Thermistance.....  | 11 |
| <b>Figure 1.9</b> : Thermocouple.....  | 12 |
| <b>Figure 1.10</b> : Principe de mesure avec thermocouple.....                   | 12 |
| <b>Figure 1.11</b> : Capteur LM35DZ.....   | 13 |
| <b>Figure 2.1</b> : Le schéma synoptique.....                                    | 15 |
| <b>Figure 2.2</b> : Correcteur PID parallèle.....                                | 18 |
| <b>Figure 2.3</b> : procédé stable.....  | 19 |
| <b>Figure 2.4</b> : procédé instable.....  | 19 |
| <b>Figure 2.5</b> : Réponse d'un système du premier ordre.....                   | 20 |
| <b>Figure 2.6</b> : Banc expérimentale d'identification.....                     | 21 |
| <b>Figure 2.7</b> : Principe de la régulation TOR à hystérésis.....              | 21 |
| <b>Figure 3.1</b> : Le schéma synoptique.....                                    | 25 |
| <b>Figure 3.2</b> : schéma de la carte d'alimentation.....                       | 26 |
| <b>Figure 3.3</b> : Modèle du capteur LM35.....                                  | 27 |
| <b>Figure 3.4</b> : Amplificateur de tension.....                                | 28 |
| <b>Figure 3.5</b> : Étage de puissance.....                                      | 29 |
| <b>Figure 3.6</b> : Afficheur LCD.....   | 29 |
| <b>Figure 3.7</b> : Circuit de la carte principale.....                          | 30 |
| <b>Figure 3.8</b> : Organigramme principal.....                                  | 31 |
| <b>Figure 3.9</b> : Organigramme de régulation.....                              | 31 |
| <b>Figure 3.10</b> : Simulation avec ISIS PROTEUS.....                           | 34 |
| <b>Figure 3.11</b> : Vue de logiciel PICkit2.....                                | 35 |

# Introduction Générale

---

Le besoin de monter en température, la nécessité de disposer d'un moyen de traitement thermique, le développement de la métallurgie ont fait que les fours électriques connaissent un essor et une réputation sans pareille dans le monde industriel. D'autre part l'évolution de l'électronique de puissance et l'apparition des circuits programmables ont permis d'élaborer des systèmes de commande, en vue de contrôler leurs puissances et leurs températures et permettant ainsi d'avoir des performances répondant au mieux aux besoins exprimés par les industriels utilisateurs.

Les techniques de commandes analogiques sont très répandues et conviennent dans la plus part des procédés thermiques, mais elles présentent quelques inconvénients et il est nécessaire d'avoir recours à la commande numérique. Les techniques de cette dernière sont multiples, elles varient selon le système à commander.

Notre travail consiste à réaliser une carte de commande à base d'un microcontrôleur PIC 16f877A, pour commander la température d'un four électrique de manière plus performante.

Un algorithme tout-ou-rien à hystérésis a été implémenté et un affichage sur écran LCD permet le suivi de la température interne du four

Ce travail est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre donne un aperçu sur les fours électriques et une description détaillée du four électrique à résistance.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de notre approche technique de ce projet et la description de l'algorithme adopté.
- Le troisième chapitre explique en détail notre contribution dans ce projet. Dans ce chapitre sont présentés les réalisations matérielles et logicielles.

# **Chapitre I :**

## **Etat de l'art des fours électriques**

## 1 Introduction

Les fours et les étuves se rencontrent dans un grand nombre de secteurs industriels mais principalement dans l'industrie des métaux, des matériaux et des céramiques. Le choix des équipements et des fonctions des fours et étuves dépend des applications et des besoins de l'utilisateur. Les aspects énergétiques et les modélisations avec un logiciel approprié permettent de les comprendre et de les maîtriser. Les modes de conduite de ces outils de production sont en rapport avec les besoins et les contraintes thermiques. L'objectif de ce premier chapitre est de situer notre travail dans son contexte général. Tout d'abord, nous commencerons par une description de la problématique ainsi que l'objectif de notre projet. Puis nous définissons les fours, ensuite nous introduisons brièvement les types de fours en insistant sur « Les fours à résistance » objectif de notre projet.

## 2 Problématique

En régulation industrielle les systèmes utilisant des techniques de commandes analogiques sont très répandus et conviennent dans la plupart des procédés thermiques, mais ils présentent plusieurs lacunes notamment au niveau de l'utilisation automatique. La mesure de la température est effectuée manuellement grâce à la visualisation directe d'un capteur de température ; ce qui représente une difficulté pour les utilisateurs.

C'est dans ce cadre qu'intervient notre projet consistant à réaliser une carte de commande à base du microcontrôleur PIC 16f877A, pour réguler la température d'un four électrique de manière optimale.

## 3 Objectif

L'objectif principale de ce projet est de régler automatiquement la température de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent survenir.

## 4 Définition [1]

Un four est une chambre thermiquement isolée ou une enceinte maçonnée utilisée pour le chauffage, la cuisson ou le séchage d'une substance, et le plus souvent utilisée pour la cuisson. Le four permet le traitement d'objets par la chaleur : poterie, céramique, verres, métaux...etc.

## 5 Les types des fours [2]

### 5.1 Four de cuisine

Le four est devenu progressivement un équipement ménager de plus en plus répandu qui est utilisé à l'intérieur de la maison pour la cuisine familiale ou dans les restaurants. Les types de four les plus répandus sont ceux alimentés au gaz ou à l'électricité.

Les fours encastrables sont une catégorie à part des fours de cuisines. Plutôt que d'être posés sur une surface, ceux-ci sont installés dans un encastrement directement dans un mur ou dans un meuble prévu à cet effet. Cela permet de gagner beaucoup de place dans les petites cuisines et offre aussi la possibilité d'éloigner les évacuations d'air chaud du four.

## 5.2 Fours à microondes

Le four à micro-ondes est un four fonctionnant grâce à l'agitation des molécules, d'eau ou de graisse, par les micro-ondes générées dans l'appareil. C'est un système de réchauffement particulier utilisé quotidiennement là où l'énergie électrique est disponible.

## 5.3 Fours solaires

Apparue dans les années 1970, la cuisine solaire consiste à préparer des plats à l'aide d'un cuiseur ou d'un four solaire. Les petits fours solaires permettent des températures de cuisson de l'ordre de 150 °C, alors que le four d'Odeillo peut atteindre 3500 °C.

Les paraboles solaires permettent de faire les mêmes plats qu'une cuisinière classique à gaz ou électrique partout où l'énergie solaire est suffisante.

## 5.4 Four de poterie

Les fours de poterie ont une conception différente des autres fours. Ils peuvent être des fours primitifs (fours enterrés par exemple), des fours à bois, ou des fours électriques ou à gaz.

## 5.5 Four industriel

- un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation) ;
- un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie).

# 6 Les fours électriques à résistance [3]

## 6.1 Introduction

Le chauffage électrique présente le plus souvent des avantages tel que la simplicité, la possibilité d'une régulation précise, la propreté, etc... De ce fait, les fours électriques ont trouvé d'innombrables applications dans l'industrie à titre d'exemple la fusion, le chauffage, le traitement thermique et le refroidissement des métaux et des produits minéraux, ainsi que le séchage et la stérilisation des produits organiques utilisés dans les industries chimique et alimentaire.

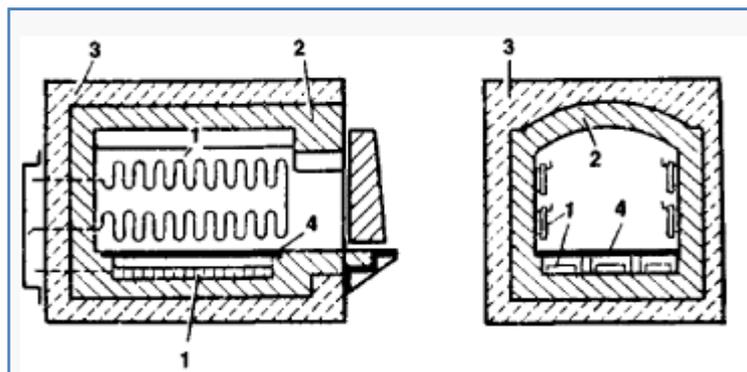
Les fours électriques à résistances sont les équipements électrothermiques industriels les plus connus et les plus répandus, présents dans un grand nombre de procédés. Encore de nos jours, ils font l'objet de perfectionnements, comme l'amélioration de la durée de vie des résistances et l'élaboration de nouveaux isolants thermiques.

### 6.2 Description

Il est constitué d'une enceinte chauffée à l'aide de résistances électriques, très bien calorifugée pour réduire le plus possible les déperditions thermiques. La charge à chauffer est placée dans cette enceinte. Le four à résistances est un équipement à chauffage indirect, la chaleur produite par effet Joule par les résistances est transmise à la charge par rayonnement ou convection.

Les fours à résistance sont largement utilisés en raison de leurs nombreux avantages. Toute température jusqu'à 3000 °C peut être obtenue dans la chambre du four. Les articles peuvent être chauffés uniformément soit en plaçant de manière appropriée les éléments chauffants le long des parois de la chambre du four, soit par circulation forcée de l'atmosphère du four. Le contrôle automatique de la puissance et, par conséquent, des conditions de température dans un tel four est facilement mis en œuvre. Les fours à résistance sont facilement mécanisés et automatisés, ce qui allège le travail du personnel et facilite l'inclusion de tels fours dans les lignes de transfert automatiques. De plus, ils sont compacts. Ces fours fournissent un environnement sécurisé pour divers processus. Un four à résistance peut être bien scellé, auquel cas le chauffage est effectué sous vide ou il peut contenir un milieu gazeux empêchant l'oxydation ou une atmosphère spéciale pour la cémentation chimique, par exemple pour la carburation ou la nitruration.

La plupart des fours à résistance sont de type indirect. Dans les fours à résistance indirecte, l'énergie électrique est convertie en chaleur lorsqu'un courant traverse les éléments chauffants. La chaleur est transmise aux articles à chauffer soit par rayonnement, ou convection. Un tel four est constitué d'une chambre de travail formée d'un revêtement composé d'une couche de brique réfractaire qui supporte à la fois les objets à chauffer et les éléments chauffants et qui est isolée d'une enveloppe métallique par une couche d'isolation thermique. Les pièces et les mécanismes qui fonctionnent dans la chambre, ainsi que les éléments chauffants, sont en acier résistant à la chaleur, en acier réfractaire ou en un autre matériau réfractaire.



**Figure 1.1** : Schéma de la chambre de résistance à chaleur indirecte.

#### Paramètres du four :

- (1) éléments chauffants,
- (2) revêtements réfractaires,
- (3) isolants thermiques,
- (4) plaques de foyer réfractaires.

### 6.3 Caractéristiques des fours à résistances

Un four à résistances est essentiellement constitué :

- d'une enceinte (laboratoire ou chambre de chauffe) réalisée à partir de matériaux à caractère isolant ou réfractaires dont le rôle est de réduire les pertes thermiques par transmission vers l'extérieur ;
- de résistances électriques disposées en voûte, en sole ou sur les parois latérales (pariétales) de l'enceinte. Leur alimentation est assurée soit directement par le réseau, soit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs transformateurs ; un système de modulation de la puissance y est associé, piloté par un système de régulation de température ;
- de la charge à traiter, caractérisée par sa forme, sa nature et sa température initiale.

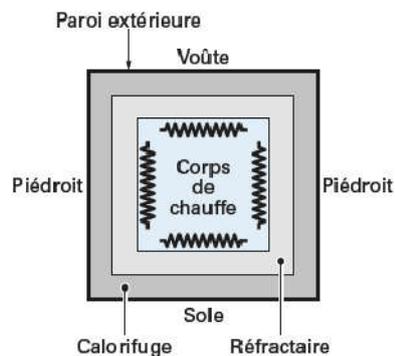


Figure 1.2: Représentation schématique d'un four à résistance.

### 6.4 Différents types de fours électriques à résistances

Plusieurs types de fours électriques à résistances sont connus. Ces différents types ne diffèrent que sur la base de la forme ou du mécanisme intégré de leurs enceintes (positionnement des résistances dans l'enceinte...). Ainsi nous avons :

- Fours à sole.
- Fours à cloche.
- Fours à plateau tournant.
- Fours à chaînes et à convoyeur.
- Fours continus à tablier, à tapis ou à bande.
- Fours à wagonnets.
- Étuves électriques.
- Fours spéciaux.

### 7 Les fours industriels [4]

Un four est un système utilisé pour élever la température d'un produit. Il peut être soit :

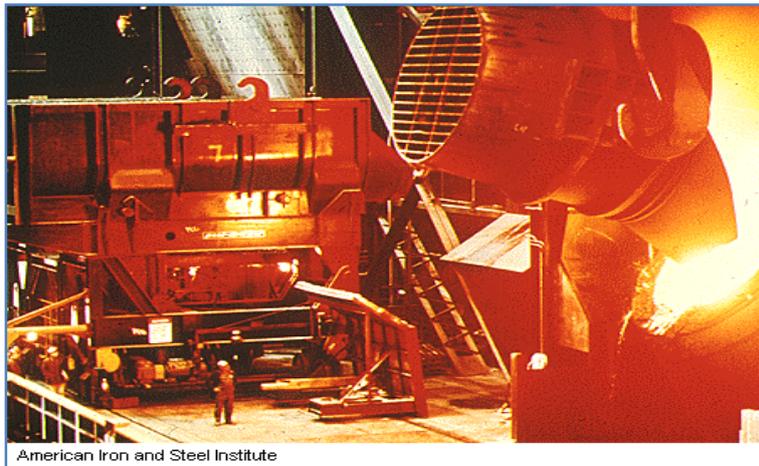
- un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation).
- un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie).

Il s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est un des éléments. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui rend une approche globale assez délicate. On peut citer notamment :

#### 7.1 Les fours de l'industrie sidérurgique

L'acier est élaboré suivant deux filières :

- réduction du minerai (oxydes de fer) dans des hauts fourneaux et élimination de l'excès de carbone de la fonte liquide (3 à 4,5 %) dans des convertisseurs à l'oxygène ;
- fusion de ferrailles (acier recyclé) dans des fours électriques.



**Figure 1.3 :** Four sidérurgique.

Le produit obtenu par ces deux voies est traité dans des stations d'affinage où il est amené à sa composition chimique finale par ajustement définitif du taux de carbone et addition des éléments qui donneront à l'acier les caractéristiques souhaitées. Opération appelée mise en nuance.

L'acier liquide obtenu est solidifié dans des machines de coulée continue desquelles il sort sous forme d'ébauches appelées demi-produits dont les dimensions typiques sont :

Antérieurement à l'apparition des coulées continues (au début des années 60), l'acier était coulé en lingots et subissait un premier laminage pour être mis sous forme de demi-produits.

## Chapitre I : Etat de l'art des fours électriques

---

Les demi-produits sont le point de départ de tous les produits sidérurgiques obtenus par laminage (plaques, tôles, feuilles, feuillards, fils, barres, rails, poutrelles, tubes, roues, etc.).

À la sortie de la coulée continue, les demi-produits sont soit directement chargés dans les fours de réchauffage pour être portés à la température appropriée pour le laminage (1100 à 1300 °C), soit stockés jusqu'à leur inclusion dans un programme de laminage. Les fours de réchauffage doivent donc harmoniser les rythmes de production de l'aciérie et du laminoir.

Pour accomplir leur tâche, les fours de réchauffage doivent s'adapter à un certain nombre de contraintes, par exemple :

- implantation : la longueur des fours est souvent limitée par des installations existantes lors de leur construction (bâtiments, ponts roulants, tables à rouleaux, etc.) ;
- produits : diversité des caractéristiques (température de laminage, diffusivité, résistance au fluage, dimensions, température d'enfournement) ;
- combustibles : gaz sidérurgiques avec fluctuations de qualité et de quantité,
- réaliser le meilleur compromis pour la satisfaction de critères suivants, souvent contradictoires : productivité, homogénéité des températures, flexibilité, fiabilité, économie, etc.

### 7.2 Les fours de cimenterie

La cuisson du clinker est une étape intermédiaire des trois étapes importantes du processus de fabrication du ciment, à savoir:

- la préparation des matières premières ;
- la cuisson du clinker ;
- le broyage du clinker.



**Figure 1.4 :** Four de cimenterie.

## Chapitre I : Etat de l'art des fours électriques

---

Dans une approche systématique, on dira que la fonction de l'atelier de cuisson consiste à transformer, par traitement thermique, un matériau « cru » en un semi-produit désigné sous le nom de clinker. La préparation du « cru » consiste à mélanger et broyer les matières premières de manière à obtenir un produit ayant une composition et une finesse prédéfinies.

### 7.3 Les fours de l'industrie verrière

C'est dans le four de fusion que se réalise le processus d'élaboration du verre à partir du mélange vitrifiable. Celui-ci est obtenu par un mélange intime des matières premières préalablement dosées auquel on ajoute au minimum 10 % de verre broyé appelé calcin ou groisil. Cette adjonction de verre broyé est indispensable pour obtenir une qualité de verre correcte, et peut atteindre 90 % du fait de l'utilisation croissante du verre de récupération. Ce mélange vitrifiable est appelé « composition » par les verriers.



**Figure 1.5 :**Four de l'industrie verrière.

- L'élaboration s'effectue à des températures comprises entre 1200 et 1600 °C et comporte essentiellement quatre phases :
  - la fusion du mélange vitrifiable qui passe de l'état pulvérulent à l'état liquide ;
  - l'affinage qui assure l'élimination des composés gazeux résultant des réactions chimiques produites pendant la fusion ;
  - l'homogénéisation chimique et physique de la masse vitreuse ;
  - le conditionnement qui abaisse la masse vitreuse à une température compatible avec son utilisation ultérieure, en général de l'ordre de 1000 à 1300 °C.

Dans la plupart des cas, le conditionnement se termine dans des canaux réalisés en matériaux réfractaires reliant le four à chacune des machines de formage. Ces canaux, équipés de dispositifs de chauffage et de refroidissement, sont appelés « feeders » par les verriers.

## Chapitre I : Etat de l'art des fours électriques

---

Ces différentes phases du processus d'élaboration peuvent se réaliser :

- soit, simultanément, dans différentes parties du four, dans le cas des fours à bassin continus ;
- soit, successivement, dans le cas des fours à creusets (fours à pots) ou des fours « day tank ».

Dans tous ces fours, la répartition du chauffage a une grande importance dans la mesure où les courants de verre engendrés par les gradients thermiques dans la masse vitreuse en fusion jouent un rôle primordial dans la qualité de l'affinage et de l'homogénéisation.

En fonction du mode de chauffage, on peut classer les fours de fusion en deux grandes catégories :

- les fours à flammes utilisant des combustibles fossiles, dans lesquels l'énergie thermique est transmise au verre par échange thermique entre les flammes et la surface du bain de verre ;
- les fours électriques dans lesquels l'énergie thermique est produite par effet Joule dans la masse du verre en fusion.

Un chauffage d'appoint électrique est souvent installé sur les fours à flammes, soit pour augmenter momentanément la production du four, soit pour améliorer la qualité du verre.

### 7.4 Les fours des industries céramiques et des produits réfractaires

Les céramiques réfractaires sont des céramiques structurales qui résistent aux hautes températures. Elles constituent un sous-ensemble des matériaux réfractaires.

Les réfractaires sont utilisés dans les « industries du feu », notamment dans tous les revêtements intérieurs des fours industriels. Ils sont présents au cœur chaud de la majorité des processus de transformation de la matière, de production de l'énergie ou de confinement de la chaleur impliquant des températures allant de 600 °C à plus de 2000 °C.



**Figure 1.6 :** Four des industries céramiques.

Il existe plusieurs grandes familles de réfractaires :

- les réfractaires électro-fondus. La fusion des matières premières permet de produire, après solidification, des blocs ou pièces réfractaires électro-fondus ;
- les réfractaires obtenus par agglomération de particules. Dans ce cas, la cohésion des particules s'obtient par frittage ou par réaction chimique. On distingue :
  - les céramiques réfractaires, frittées par cuisson à haute température avant une éventuelle étape de finition,
  - les réfractaires de carbone ou les composites oxydes-carbone à liants carbonés. La cohésion se fait par polymérisation des résines ou par polycondensation et réticulation dans le cas des brais et des goudrons,
  - les réfractaires à liaison chimique minérale. Les liaisons minérales agissent à froid par formation de gels, puis à moyenne température par réaction chimique avec les particules fines du produit,
  - les réfractaires à liaison hydraulique. La liaison assurée par l'hydratation d'un ciment réfractaire alumineux est mise en œuvre dans les bétons réfractaires.

Les performances des céramiques réfractaires doivent beaucoup au savoir-faire du passé, notamment aux métiers des arts céramiques (en particulier la faïence et la porcelaine), puis aux industries du bâtiment (briques de construction, terre cuite, sanitaire...) et à la sidérurgie qui repousse les limites d'usage des céramiques réfractaires au-delà des 1500 °C. En 1897, le four à arc atteint 2000 °C. Au XXI<sup>e</sup> siècle, l'ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) mettra simultanément en œuvre plusieurs techniques de chauffage pour porter le plasma à 150 millions de degrés Celsius dans le cœur de la machine.

En dehors du niveau de température élevée et donc de l'infusibilité de ces matériaux qui est le caractère principal de tous les réfractaires, les céramiques réfractaires doivent posséder un nombre important de propriétés complémentaires pour résister aux sollicitations qu'elles subissent en utilisation. Dans la mesure où leur comportement est principalement gouverné par des phénomènes de corrosion, la composition chimique, la minéralogie, la microstructure et la porosité sont des caractéristiques essentielles. La connaissance des propriétés thermomécaniques des matériaux et des sollicitations des revêtements (choc thermique, érosion, blocage de dilatation...) sont également à considérer.

## 8 Les capteurs de température

Il est possible de mesurer la température de plusieurs façons différentes qui se distinguent par le coût des équipements et la précision ainsi que le temps de réponse. Les types les plus courants de capteurs sont les sondes RTD, les thermistances et les thermocouples.

### 8.1 Les sondes RTD (Resistance Temperature Detectors) [5]

Les RTD sont des capteurs de température à résistance. Ils fonctionnent sur le principe des variations de résistance électrique des métaux purs et se caractérisent par une modification positive linéaire de la résistance en fonction de la température.



**Figure 1.7 :** Sonde RTD.

Concrètement, une fois chauffée, la résistance du métal augmente et inversement une fois refroidie, elle diminue.

Les éléments types utilisés pour les RTD incluent le nickel (Ni) et le cuivre (Cu) mais le platine (Pt) est de loin le plus courant, en raison de l'étendue de sa gamme de températures, de sa précision et de sa stabilité.

Faire passer le courant à travers une sonde RTD génère une tension à travers la sonde RTD. En mesurant cette tension, on détermine sa résistance et ainsi, sa température.

Les RTD peuvent mesurer des températures pouvant atteindre 850°C.

### 8.2 Thermistance [6]

Les thermistances, comme les capteurs de température à résistance (RTD), sont des conducteurs thermosensibles dont la résistance varie avec la température.



**Figure 1.8 :** Thermistance.

La gamme de températures ne dépassant pas 300 °C.

Les thermistances sont constituées d'un matériau semi-conducteur d'oxyde métallique encapsulé dans une petite bille d'époxy ou de verre.

En outre, les thermistances présentent généralement des valeurs de résistance nominale plus élevées que les RTD (de 2000 à 10000  $\Omega$ ) et peuvent être utilisées pour de plus faibles courants.

### 8.3 Thermocouple [7]

Les thermocouples sont les capteurs les plus souvent utilisés pour la mesure de températures, car ils sont relativement peu onéreux, tout en étant précis, et peuvent fonctionner sur une large gamme de températures.

Les thermocouples présentent un taux de réponse rapide (de l'ordre de la milliseconde).

## Chapitre I : Etat de l'art des fours électriques

Un conducteur génère une tension lorsqu'il est soumis à une variation de température ; cette tension thermoélectrique est appelée tension Seebeck.



Figure 1.9 : Thermocouple.

La mesure de cette tension nécessite l'utilisation d'un second matériau conducteur générant une tension différente pour une même variation de température (sinon la tension générée par le deuxième conducteur qui effectue la mesure annule tout simplement celle du premier conducteur).

En s'appuyant sur le principe de Seebeck, il est clair que les thermocouples ne peuvent mesurer que des différences de température entre le point de référence (soudure froide) et le point de mesure (soudure chaude). Ceci nécessite que la température de référence soit connue. Les thermocouples peuvent fonctionner sur une large gamme de températures.

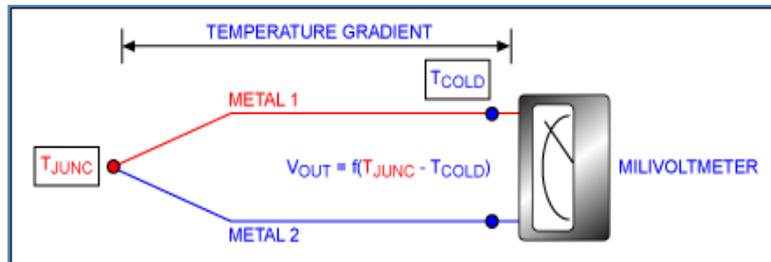


Figure 1.10 : Principe de mesure avec thermocouple.

### 8.4 Choix du capteur de température

Les capteurs de température doivent être choisis soigneusement, notamment lorsqu'ils sont utilisés en tant que composants dans une chaîne de régulation. Il est nécessaire de tenir compte :

- de la sensibilité du capteur suivant l'utilisation souhaitée, la précision de la mesure.
- du milieu d'utilisation, par exemple en cas de chocs thermiques ou mécaniques.
- de l'inertie thermique du capteur.
- du système de régulation.

Pour notre projet nous utilisons le capteur de température LM35DZ.



### Caractéristiques:

- Calibré directement en Celsius (Celsius).
- Facteur d'échelle linéaire + 10 mV / ° C.
- 0.5 ° C Précision assurée (à 25 ° C).
- Conçu pour une plage allant de 0 ° C à 100 ° C.
- Convient aux applications distantes.
- Économique grâce à la découpe au niveau de la plaquette.
- Fonctionne de 4 V à 30 V.
- Drainage actuel inférieur à 60  $\mu$ A.
- Faible auto-échauffement, 0,08 ° C à l'air calme.
- Non-linéarité uniquement  $\pm 1/4$  ° C.
- Sortie à basse impédance, 0,1  $\Omega$  pour une charge de 1 mA.

## **Chapitre II :**

# **La régulation**

## 1 Introduction

La sortie du procédé que l'on commande doit évoluer pour suivre la consigne demandée. Il faut donc à tout instant (ou périodiquement en régulation numérique) appliquer, à l'entrée de puissance du procédé, la commande appropriée. Cette commande est calculée par un ensemble de traitements d'informations, le correcteur, qui utilise des opérateurs (sommateurs, gains, intégrateurs, dérivateurs) élaborant la commande à partir du signal d'erreur et des mesures auxiliaires disponibles.

Notre projet s'inscrit dans ce cadre et consiste à réguler la puissance de chauffe d'un four électrique. Nous utilisons à cet effet un algorithme exécuté par le microcontrôleur pic 16f877A. Il s'agit de l'algorithme Tout ou Rien à hystérésis, qui convient parfaitement à ce genre de procédé connu pour leur grande inertie.

## 2 Système proposé

### 2.1 Le schéma synoptique

Nous proposons un synoptique du système de régulation étudié, dont le principe de fonctionnement est le suivant :

Au démarrage le chauffage du four est déclenché par le microcontrôleur, et la température interne du four va augmenter. Le capteur de température LM35DZ transmet un signal électrique amplifié à l'unité de traitement. Celle-ci convertit ce signal en numérique et exécute l'algorithme TOR à hystérésis. Cet algorithme consiste à comparer la mesure à deux seuils de température ( $T_{sup}$  et  $T_{inf}$ ) encadrant la valeur de consigne  $T_c$ . Tant que la mesure est à l'intérieure de cet intervalle  $[T_{inf}, T_{max}]$  le chauffage du four est maintenue. Si par contre la température est supérieure à  $T_{max}$  ou inférieure à  $T_{inf}$ , le chauffage est soit coupé respectivement rétablie.

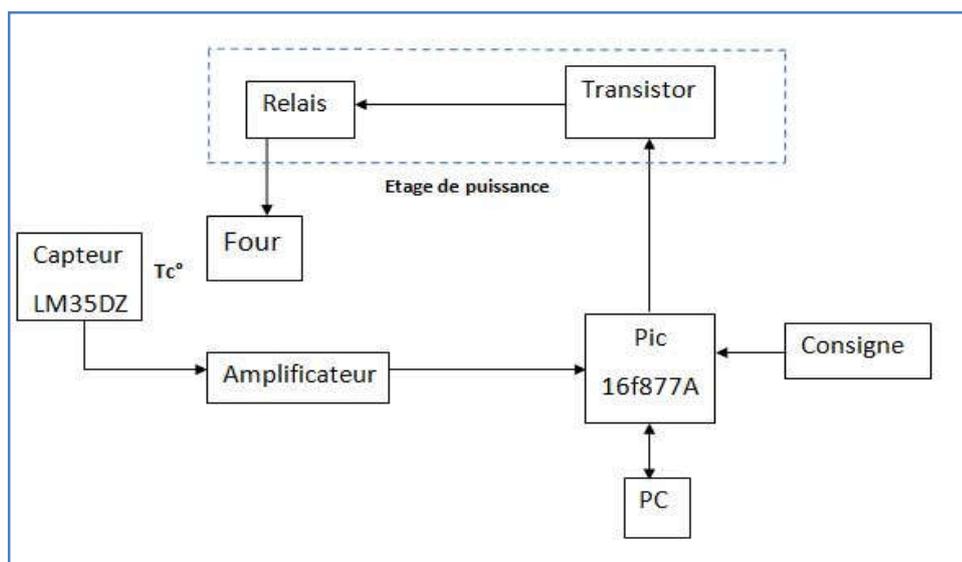


Figure 2.1 : Le schéma synoptique.

### 2.2 Fonctions des différents modules

Nous présentons ci-après les modules constituant le schéma synoptique ainsi que leur fonction.

#### 2.2.1 Le microcontrôleur

C'est l'unité de commande du process industriel. Il assure l'interfaçage entre l'installation industrielle et l'unité de supervision (PC). Dans ce synoptique le microcontrôleur remplit trois fonctions, à savoir :

- Acquisition des signaux analogiques (température, consigne),
- Traitement de l'algorithme de régulation,
- Commande en puissance du four.

Il doit aussi assurer une communication avec le PC pour un échange d'informations sur le déroulement de la gestion du procédé industriel. Le microcontrôleur 16f877A est capable de remplir toutes ces fonctions en plus de la disponibilité des lignes de ports.

#### 2.2.2 L'étage de puissance

Cet étage est une interface entre le microcontrôleur et le four électrique. Pour piloter un actionneur de forte puissance on doit veiller à ce que l'unité de commande soit protégée de la tension élevée de l'actionneur et fournir le courant suffisant aux éléments chauffants du four. C'est justement le rôle de ce module constitué essentiellement d'un transistor de puissance et d'un relais électromagnétique.

#### 2.2.3 Le four électrique

Un four est un appareil, muni d'un système de chauffage puissant, qui transforme, par la chaleur, les produits et les objets. Pour notre application nous avons conçu une boîte hermétique à l'intérieur de laquelle on a placé l'élément chauffant et le capteur de température.

#### 2.2.4 Le capteur

Pour surveiller l'évolution de la température du four il est impératif d'utiliser un capteur de température. Dans le premier chapitre nous avons longuement exposés ce sujet. Pour la réalisation de notre projet nous avons décidés d'utiliser le capteur LM35DZ.

Dans ce projet nous nous sommes limités à une température maximale de 50 °C. Une étude pour des températures plus élevées (par exemple 100 °C) ne devrait pas poser de problème. Il suffit de faire intervenir éventuellement un moyen de refroidissement forcé (ventilateur) car les chaleurs mises en jeu seront considérables et pourrait être dangereuses.

#### 2.2.5 L'amplificateur

Le capteur de température délivre un signal de faible amplitude (10mV/°C). Il doit être amplifié avant sa conversion en un signal numérique par le microcontrôleur. La conversion d'un signal plus fort (supérieur à 1 volt) garantit une immunité aux bruits et donne une mesure plus précise.

### 2.2.6 La consigne

La consigne est un paramètre constant dans un système de régulation industrielle. Elle représente le point de fonctionnement du procédé, la régulation se fait autour de cette valeur de consigne. L'utilisateur a la possibilité de fixer cette valeur de consigne à l'aide d'un potentiomètre. L'unité de traitement récupère cette valeur de tension aux bornes du potentiomètre et la convertit en une valeur numérique pour la comparaison avec les mesures (signal de température du capteur).

### 2.2.7 Le micro-ordinateur : PC

Il est toujours possible de connecter un PC au microcontrôleur pour un transfert de données et d'informations entre le microcontrôleur et le PC. Par exemple on peut envoyer la valeur de la consigne depuis le PC, modifier les seuils de comparaison (hystérésis), suivre l'évolution de la température, détecter des pannes, etc. L'accès au PC est réservé exclusivement au superviseur. En cas de maintenance une équipe est dépêchée au niveau de l'installation industrielle.

## 3 La régulation industrielle

### 3.1 Le régulateur PID

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

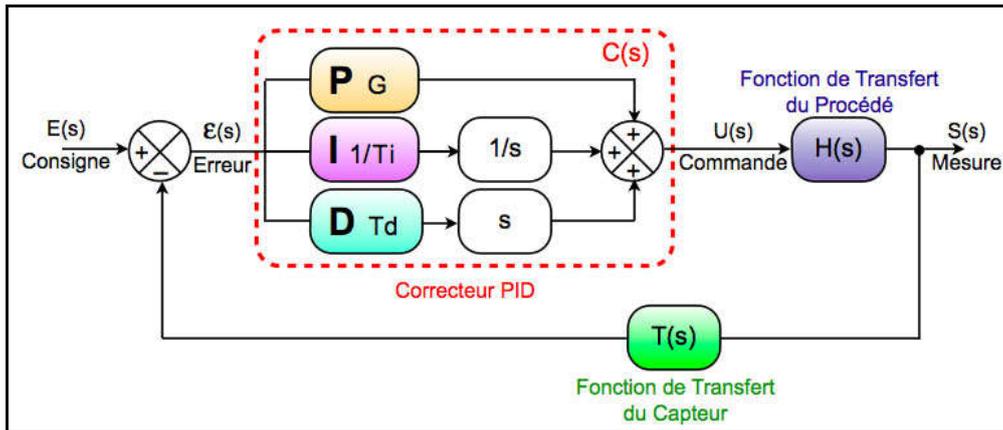
#### 3.1.1 Principe du correcteur PID[8]

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

Le correcteur PID agit de trois manières :

- action proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain  $G$  ;
- action intégrale : l'erreur est intégrée et divisée par un gain  $Ti$  ;
- action dérivée : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain  $Td$ .

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les trois effets (série, parallèle ou mixte), on présente ici la plus classique : une structure PID parallèle qui agit sur l'erreur.



**Figure 2.2 :** Correcteur PID parallèle

Sur le schéma ci-dessus, la fonction de transfert exprimée dans le domaine de Laplace du régulateur PID parallèle est la somme des trois actions :

$$C(p) = G + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{p} + T_d \cdot p$$

En régulation des procédés, on préfère implanter la fonction de transfert du PID sous la forme mixte :

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

Où  $T_i$  et  $T_d$  sont des constantes de temps (différentes de  $T_i$  et  $T_d$  dans la formulation précédente) et  $G$  est le gain de la partie proportionnelle.

Les différents paramètres à trouver sont  $G$ ,  $T_d$  et  $T_i$  pour réguler la grandeur physique du procédé ayant pour fonction de transfert  $H(s)$ . Il existe de nombreuses méthodes pour trouver ces paramètres. Cette recherche de paramètre est communément appelée synthèse.

### 3.1.2 Réglage d'un PID[9]

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients  $G$ ,  $T_d$  et  $T_i$  afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. Les objectifs à atteindre sont :

- stabilité,
- rapidité,
- et précision.

Ces trois critères peuvent être étudiés dans les deux situations suivantes :

- ✓ dans le cas d'un fonctionnement en mode de régulation (consigne fixe) choisir des réglages permettant à la grandeur réglée de retourner dans un temps raisonnable à sa valeur de consigne ;
- ✓ dans le cas d'un fonctionnement en mode asservissement (consigne variable), choisir des réglages permettant de limiter le ou les éventuels dépassements (overshoot) de la grandeur réglée.

### 3.2 Définitions

#### 3.2.1 La stabilité

- **Procédés stables**

Un procédé est dit naturellement stable si à une variation finie de la grandeur réglante  $E$  correspond une variation finie de la grandeur réglée  $S$ .

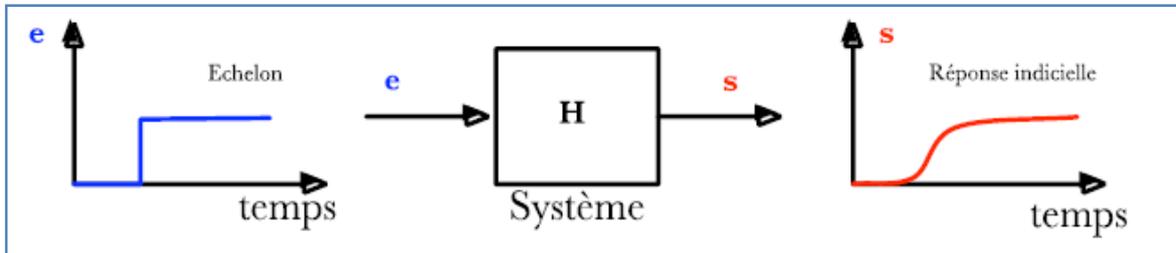


Figure 2.3 : procédé stable.

Exemple :

- Grandeur réglée: température d'une pièce ;
- Grandeur réglante : puissance du radiateur.

- **Procédé instable**

Un système est dit instable si à une variation finie de la grandeur réglante  $e$  correspond une variation continue de la grandeur réglée  $s$ .

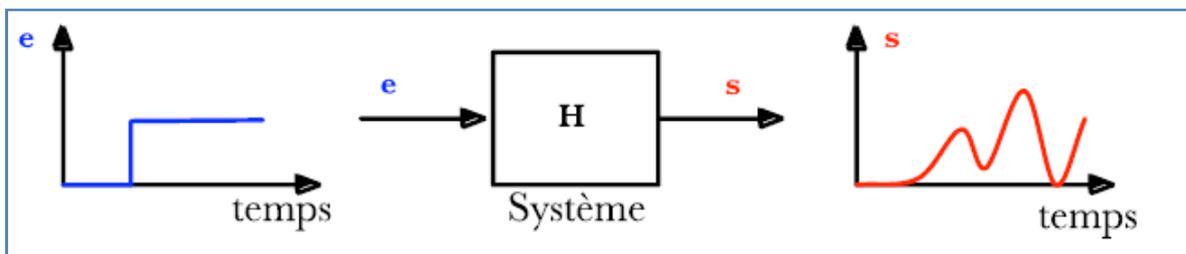


Figure 2.4 : procédé instable.

#### 3.2.2 La rapidité

La rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire ;

#### 3.2.3 La précision

Le critère de précision est basé sur l'erreur statique (ou l'écart de statisme).

La réponse type d'un procédé stable est la suivante :

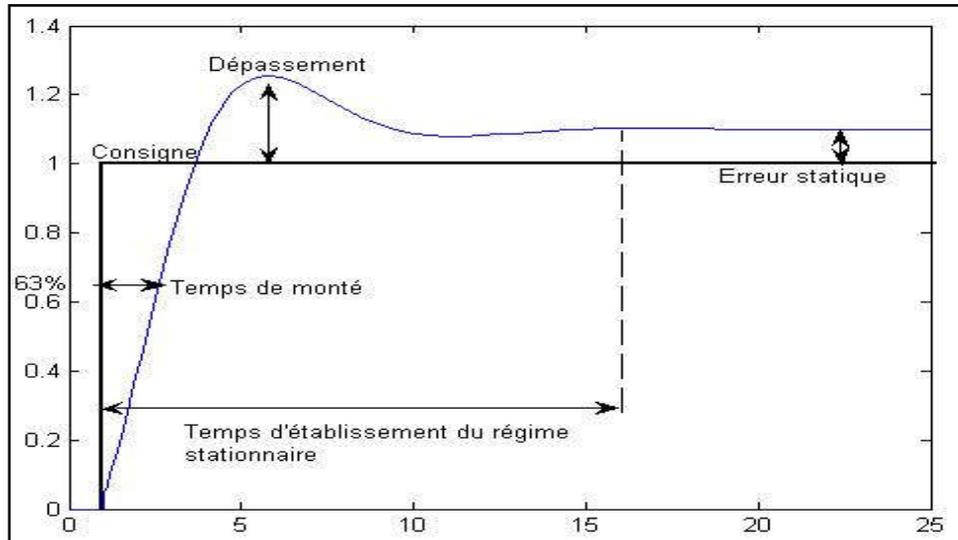


Figure 2.5 : Réponse d'un système du premier ordre .

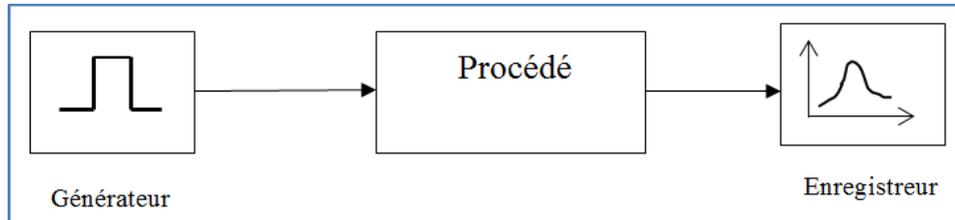
Dans le cas des systèmes simples, les paramètres du PID influencent la réponse du système de la manière suivante :

- $G$  : lorsque  $G$  augmente, le temps de montée (rise time) est plus court et l'erreur statique est réduite, mais il provoque un dépassement plus important.
- $T_i$  : lorsque  $\frac{1}{T_i}$  est présent l'erreur statique est annulée. Quand il augmente, la valeur finale est plus rapidement atteinte pour les systèmes présentant de grandes marges de stabilité. Le temps d'établissement en régime stationnaire s'allonge pour les autres systèmes qui vont davantage osciller. Le réglage de ce paramètre dépend donc du comportement dynamique du système et influe sur son amortissement et son temps de réponse.
- $T_d$  : lorsque  $T_d$  augmente, le temps de montée diminue (la réponse du système ainsi corrigé est plus rapide) et le dépassement diminue ce qui améliore la stabilité. Toutefois il n'influence pas l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps il stabilise le système avec des réactions pouvant saturer le signal de commande sortant du correcteur, et dans un deuxième temps il amplifie de manière exagérée des perturbations brèves.

L'analyse d'un système avec un correcteur PID est 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 stabilité, le dépassement et le temps d'établissement du régime stationnaire.

### 3.3 La régulation Tout Ou Rien à hystérésis

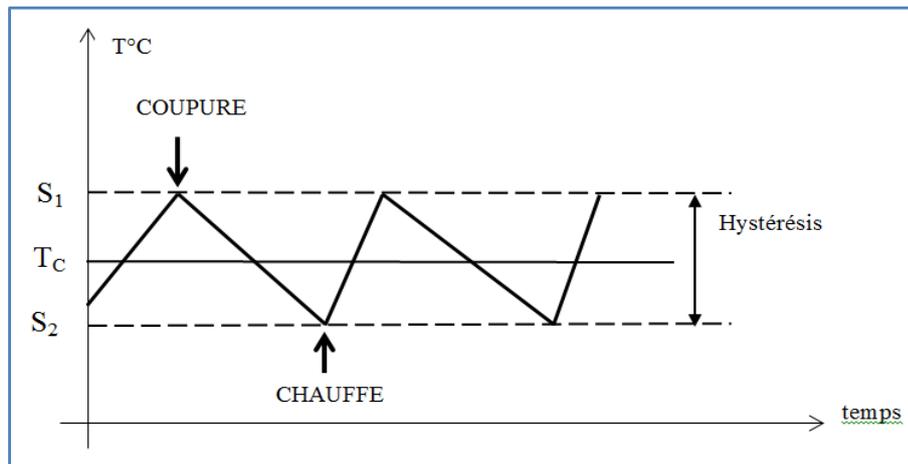
Nous avons implémenté une régulation TOR à hystérésis afin de contrôler la température du four. Le correcteur PID n'a pas été retenu car les paramètres du procédé à réguler ne sont pas connus. La connaissance de ces paramètres passe par une identification expérimentale du procédé physique.



**Figure 2.6 :** Banc expérimentale d'identification.

Le matériel nécessaire pour la mise en place de ce banc expérimentale d'identification n'étant pas disponible, on a donc utilisé la régulation TOR à hystérésis. Ce type de régulation est connu pour sa simplicité de mise en œuvre mais elle est moins précise que le correcteur PID. Cependant elle s'adapte parfaitement aux procédés d'électrothermie.

Pour le régulateur TOR à hystérésis on définit la consigne et l'écart entre ses deux seuils appelé l'hystérésis.



**Figure 2.7 :** Principe de la régulation TOR à hystérésis.

Dans cette régulation la température augmente progressivement jusqu'au seuil supérieur  $S_1$ . Le relais est alors désactivé et le four n'est plus alimenté, une phase de refroidissement démarre. La température va donc décroître jusqu'au seuil inférieur  $S_2$ . Le microcontrôleur détecte le seuil  $S_2$ , il active le relais et le four est alimenté. Une nouvelle phase de réchauffement démarre et le cycle recommence.

L'hystérésis permet d'éviter qu'au voisinage de la température de consigne, le chauffage soit trop rapidement enclenché et éteint de manière intempestive, comme c'est le cas pour le régulateur TOR simple, où on précise uniquement la valeur de la température désirée (consigne).

La bande d'hystérésis ( $S_1 - S_2$ ) dépend de 3 paramètres :

- le temps de réponse du procédé,
- la durée de vie des actionneurs,
- la précision désirée.

### 4 Le microcontrôleur 16F877A [10]

Les microcontrôleurs améliorent l'intégration et le coût (lié à la conception et à la réalisation) d'un système à base de microprocesseur en rassemblant les éléments essentiels dans un seul circuit intégré. Les microcontrôleurs sont plutôt dédiés aux applications qui ne nécessitent pas une grande quantité de calculs complexes, mais qui demandent beaucoup de manipulations d'entrées/sorties. C'est le cas de contrôle de procédé industriel.

#### 4.1 Les ports entrée/sortie

##### **PORT A (h05) et TRISA (h85) :**

Ce port bidirectionnel est constitué de 6 bits. Le registre de direction correspondant est TRISA. Quand on écrit un "1" dans TRISA, le bit correspondant du PORTA est configuré en ENTREE, et le driver de sortie est placé en haute impédance.

Si on écrit un "0", le port devient une SORTIE, et le contenu du latch correspondant est chargé sur la broche sélectionnée.

Le bit 4 du Port peut également servir pour l'entrée horloge du timer TMR0.

Les autres bits du Port sont partagés avec le convertisseur analogique-numérique.

##### **PORTB (h06) et TRISB (h86) :**

Il comporte 8 bits. Le registre de direction correspondant est TRISB.

Si on écrit un "1" dans le registre TRISB, le driver de sortie correspondant passe en haute impédance. Si on écrit un "0", le contenu du Latch de sortie correspondant est recopié sur la broche de sortie.

Chaque broche du PORT B est munie d'un tirage au +VDD que l'on peut mettre ou non en service en mode entrée uniquement. On active cette fonction par la mise à "0" du bit 7 dans le registre OPTION en h'81'.

Au reset, le tirage est désactivé.

Il est inactif quand le port est configuré en sortie.

##### **PORTC (h07) et TRISC (h87) :**

Il s'agit d'un PORT 8 bits bidirectionnel.

Il est partagé avec le module de transmission synchrone I2C et l'USART.

## Chapitre II : La régulation

### 4.2 Le convertisseur analogique-numérique

C'est un module qui assure la conversion analogique-numérique de signaux externes, délivrés par des capteurs par exemple. Ce module possède 8 entrées analogiques.

Les 5 premières entrées analogiques sont sur le Port A en PA0, PA1, PA2, PA3 et PA5.

Les 3 autres entrées analogiques sont en PE0, PE1 et PE2.

Le résultat de la conversion est codé sur 10 bits. C'est une valeur comprise entre h'000' et h'3FF'.

Les tensions de référence haute et basse peuvent être choisies par programmation parmi:

VDD ou la broche PA3 pour VREF+ et VSS ou la broche PA2 pour VREF- .

- ADRESH : contenant les 2 bits de poids fort du résultat de conversion,
- ADRESL : contenant les 8 bits de poids faible du résultat de conversion,
- ADCON0 : registre de contrôle n°0 du convertisseur.
- ADCON1 : registre de contrôle n°1 du convertisseur.

#### Choix de la fréquence d'échantillonnage :

| QUARTZ | CLOCK             | T <sub>AD</sub> | 12.T <sub>AD</sub> | Ne convient pas si T <sub>AD</sub> <1,6µs |
|--------|-------------------|-----------------|--------------------|---|
| 4 MHz  | Fosc/2 = 2 MHz    | 0,5 µs          | 6 µs               | Ne convient pas                           |
|        | Fosc/8 = 500 KHz  | 2 µs            | 24 µs              | OK  |
|        | Fosc/32 = 125 KHz | 8 µs            | 96 µs              | OK  |
| 8 MHz  | Fosc/2 = 4 MHz    | 0,25 µs         | 3 µs               | Ne convient pas                           |
|        | Fosc/8 = 1 MHz    | 1 µs            | 12 µs              | Ne convient pas                           |
|        | Fosc/32 = 250 KHz | 4 µs            | 48 µs              | OK  |
| 12 MHz | Fosc/2 = 6 MHz    | 0,16µs          | 1,92 µs            | Ne convient pas                           |
|        | Fosc/8 = 1,5 MHz  | 0,66µs          | 8 µs               | Ne convient pas                           |
|        | Fosc/32 = 375 KHz | 2,6µs           | 32 µs              | OK  |
| 16 MHz | Fosc/2 = 8 MHz    | 0,125µs         | 1,5 µs             | Ne convient pas                           |
|        | Fosc/8 = 2 MHz    | 0,5 µs          | 6 µs               | Ne convient pas                           |
|        | Fosc/32 = 500 KHz | 2 µs            | 24 µs              | OK  |

### 4.3 Les timers

Le microcontrôleur 16f877A renferme trois registres timers : TMR0 (8bits), TMR1 (16bits), TMR2 (8bits).

Le tableau suivant récapitule les principales caractéristiques des trois timers du pic16f877A.

| <b>TIMER 0</b>   | <b>TIMER 1</b>  | <b>TIMER 2</b>  |
|--|---|---|
| <b>Broche utilisée : PA4</b>   | <b>Broches utilisées : PC0 et PC1</b>   | <b>Broches utilisées : néant</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 8 bits</li><li>- Pré div de <math>2^0</math> à <math>2^8</math></li><li>- IT et Flag au débordement</li><li>- Clkint (<math>F_{osc}/4</math>) ou ext (PA4)</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- 16 bits</li><li>- Pré div de <math>2^0</math> à <math>2^3</math></li><li>- IT et Flag au débordement</li><li>- Clkint (<math>F_{osc}/4</math>) ou ext (PC0)</li><li>- Oscil quartz ext PC0/PC1</li><li>- Sert en Capture et Compare</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- 8 bits</li><li>- Période programmable dans PR2</li><li>- Pré div par 1, 4 ou 16</li><li>- Post div de 1 à 16.</li><li>- IT et Flag quand Timer 2= PR2</li><li>- Clkint (<math>F_{osc}/4</math>)</li><li>- Sert en PWM</li></ul> |

Le datasheet du pic 16f877A fournit de plus amples explications détaillées sur ce microcontrôleur.

## **Chapitre III :**

# **Conception matérielle et programmation**

### 1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la conception matérielle et le développement logiciel du système de régulation du four. Les différentes parties de la carte électronique ont été testées séparément, avant d'être assemblées. En parallèle nous avons développés le programme de gestion du four.

### 2 Conception matérielle

La conception matérielle repose sur le schéma synoptique proposé au chapitre 2 :

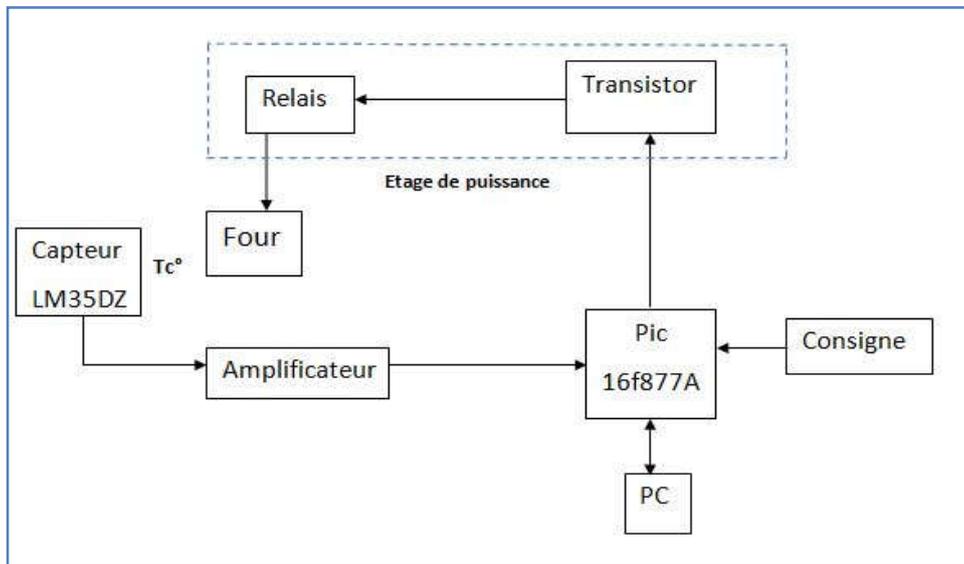


Figure 3.1 : Le schéma synoptique.

Ce schéma montre le microcontrôleur lié à trois branches principales. Ces trois branches sont :

- La branche acquisition : capteur-amplificateur
- La branche commande : étage de puissance
- La branche PC : liaison série pour la communication.

#### 2.1 Liaison PC-microcontrôleur

La liaison série permet à l'opérateur de configurer les paramètres de régulation à distance. On peut aussi récupérer des informations sur le processus en cours de fonctionnement et les afficher sur un moniteur.

Par manque de temps cette branche n'a pu être réalisée. Nous souhaitons que cette partie puisse être concrétisée dans le futur. Dans notre simulation par Proteus nous avons remplacé cette branche par un afficheur LCD.

### 2.2 Circuit d'alimentation

Avant de passer à la description des autres branches, nous allons exposer une partie qui n'apparaît pas dans le synoptique mais qui est indispensable au fonctionnement des circuits. Il s'agit du bloc d'alimentation qui fournit l'énergie nécessaire aux composants électroniques de la carte.

Nous avons réalisé une alimentation électrique fournissant les tensions +12V et +5V nécessaires pour alimenter les composants de la carte. Ces composants sont :

1. L'amplificateur LM1458 alimenté par une tension 12V,
2. Le relais alimenté par 12V,
3. Le microcontrôleur 16F877A alimenté avec le 5V.
4. Le capteur LM35DZ alimenté avec 5V.

Pour réaliser cette alimentation, nous avons utilisé les composants suivants :

- Transformateur 220V/12V
- Pont redresseur
- Deux régulateurs: LM7805 pour le 5V, LM7812 pour le 12V

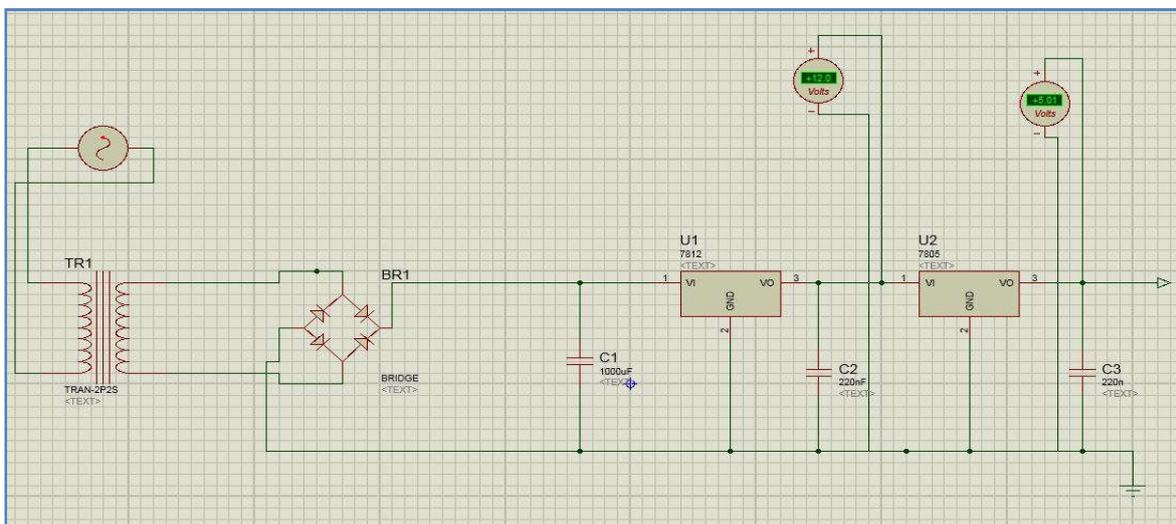


Figure 3.2 : schéma de la carte d'alimentation.

La capacité de 1000µF sert au filtrage des ondulations résiduelles, et les capacités de 220nF filtre les bruits.

### 2.3 Branche acquisition

Cette branche est formée par le capteur de température LM35DZ et l'étage amplificateur. La température de l'élément chauffant est convertie en tension par le capteur. Cette tension de l'ordre de quelques centaines de mV est amplifiée avant sa conversion par le microcontrôleur.

#### a) Le capteur LM35DZ

Ce capteur a été présenté au chapitre 1. Pour l'utiliser il suffit d'exploiter directement la pente de sa caractéristique linéaire  $V_0 = f(T^{\circ}\text{C})$ . Cette pente de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  est garantie par le constructeur.

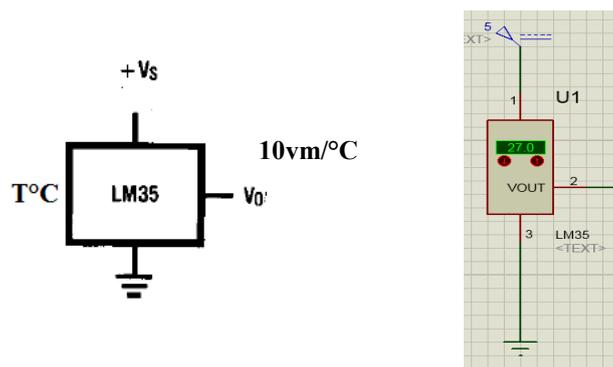


Figure 3.3 : Modèle du capteur LM35

La température du four va de l'ambiante (four éteint) à une température  $T_{\text{max}}$  fixée par le cahier de charges.

Pour notre cas  $T_{\text{max}} = 50^{\circ}\text{C}$

Comme la pente de la caractéristique est  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , l'intervalle de tension de travail est :

$$T^{\circ}\text{C} (27^{\circ}\text{C}, 50^{\circ}\text{C}) \longrightarrow V_0 (270\text{mV}, 500\text{mV})$$

#### b) L'amplificateur de tension

Pour une meilleure précision de mesure de la température, on amplifie la tension  $V_0$  du capteur pour la ramener dans l'intervalle de conversion du microcontrôleur.

Les tensions de référence internes du convertisseur analogique-numérique (CA/N) du pic16f877A sont :

$$V_{\text{REF}+} = V_{\text{DD}} = 5\text{V} \quad \text{et} \quad V_{\text{REF}-} = V_{\text{SS}} = 0\text{V}$$

On veut que pour  $T^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$  la tension  $V_{\text{IN}}$  à l'entrée du CA/N soit 5V car  $V_{\text{REF}+} = 5\text{V}$ . Ainsi lorsque la mesure fournie par le CA/N est maximale cela correspond à  $T^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$ .

D'où le rôle de l'étage amplificateur réalisé avec l'amplificateur opérationnel LM1458. C'est un amplificateur non-inverseur dont le gain est :

$$G = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \text{ avec : } R_1 = 12\text{k}\Omega \text{ et } R_2 \text{ variable}$$

On ajuste  $R_2$  pour l'obtention d'un gain  $G = 10$ .

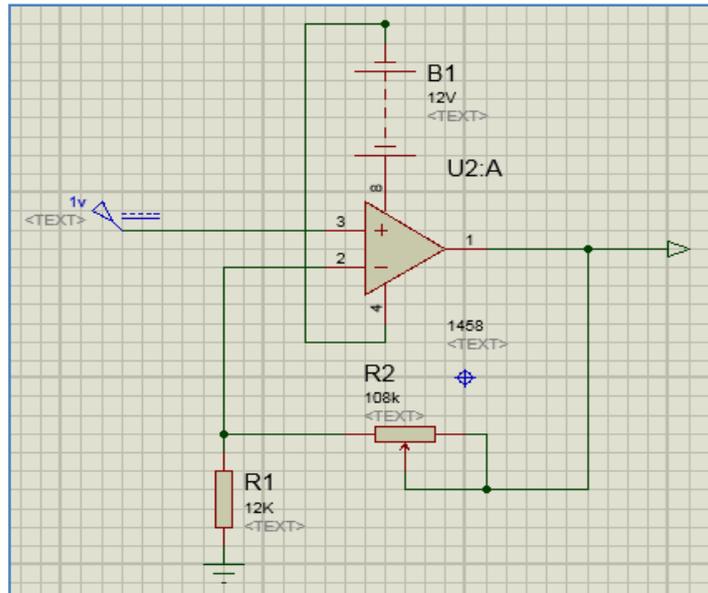


Figure 3.4 : Amplificateur de tension.

### c) La conversion analogique-numérique

La résolution du convertisseur est de 10bits, soit un pas de :

$$Q = 5000 \text{ mV} / 1023 = 4,9\text{mV}$$

Ainsi la conversion introduit une erreur de mesure de  $0,5^{\circ}\text{C}$  dû à l'erreur de conversion 1LSB.

Pour  $T = 50^{\circ}\text{C}$  et avec un ajustement à droite on lit dans les registres ADRESH et ADRESL la valeur  $N$  délivrée par le convertisseur :

$$N = (\text{0000 0011 1111 1111}) \text{ ou } N = 1023.$$

ADRESH      ADRESL

Connaissant  $N$  on en déduit directement la mesure de la température en  $^{\circ}\text{C}$  :

$$T^{\circ}\text{C} = (N / 1023) * 50^{\circ}\text{C}$$

Avec  $N > 552$  pour  $T^{\circ}\text{C} > T_{\text{amb}} = 27^{\circ}\text{C}$

## 2.4 Branche de commande

La commande générée par la régulation est un simple signal ON/OFF. Le schéma électronique qui répond à ce type de commande est un relais commandé par un transistor de moyenne puissance.

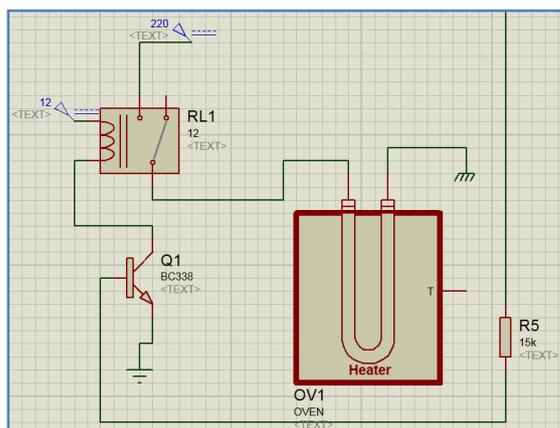


Figure 3.5 : Etage de puissance.

Lorsque le calculateur décide de brancher l'élément chauffant au secteur il génère un signal logique haut (5V) sur la base du transistor. Ce dernier se sature et ferme le relais magnétique qui à son tour connecte le four au réseau 220V.

Lorsque l'algorithme de régulation détecte la température  $T_{sup}$ , il envoie sur la base du transistor un niveau bas qui le bloque, le relais s'ouvre et le four est débranché du réseau.

### 2.5 Afficheur LCD

Pour permettre à l'utilisateur de suivre l'évolution de la température interne du four nous utilisons un afficheur LCD (Liquid Cristal Display). Ce circuit affiche aussi la température de consigne  $T_C$ . Cette afficheur a une résolution de 2x16 caractères.



Figure 3.6 : Afficheur LCD

#### a. Caractéristiques de l'afficheur LCD

L'afficheur LCD se caractérise par trois signaux de contrôle et un bus de données de 4 ou de 8 bits selon le mode de fonctionnement.

Les trois signaux de contrôle sont : **E**, **R/W** et **RS**

**E** (Enable) : entrée de validation

**R/W** (Read/Write) : indique respectivement une lecture ou une écriture d'une donnée dans l'afficheur.

**RS** (Registre Select) :

Si  $RS=1$  : on transmet une donnée.

Si  $RS=0$  : on transmet une commande.

### 6. La carte principale

La carte de la figure 3.7 regroupe tous les circuits qui participent à la régulation du four. Un potentiomètre permet à l'utilisateur de fixer la température de consigne  $T_C$ .

Cette carte à base du pic 16f877A peut évoluer vers une régulation plus élaborée du four. Il suffit pour cela de modifier la branche de commande seulement. Nous avons branché un quartz de 4Mhz pour piloter le microcontrôleur. Cette fréquence suffit largement au suivi du processus de chauffe du four.

La simulation à l'aide de Proteus apporte un gain de temps considérable dans l'étude de régulation du four. Pour passer à la réalisation pratique il suffit de disposer de certains composants qui sont parfois indisponibles.

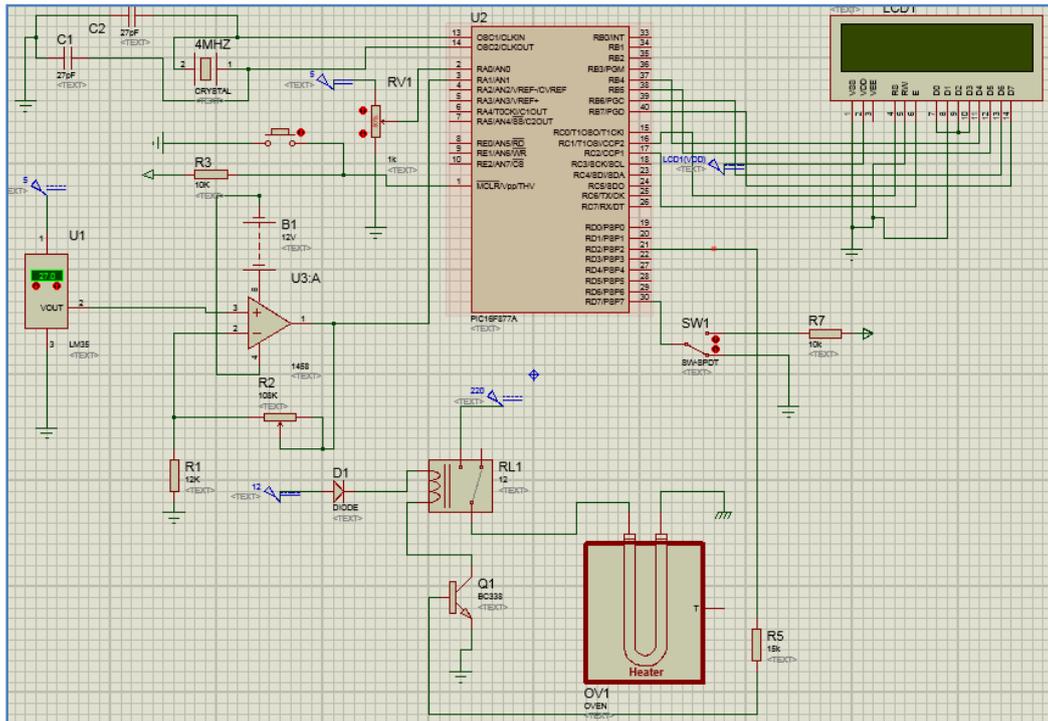


Figure 3.7 : Circuit de la carte principale.

### 3 Programmation

Le développement du programme de gestion de la carte principal doit respecter l'organigramme principal et exige la maîtrise des outils de programmation. Nous utilisons le langage de programmation C adapté aux microcontrôleurs de microchip et l'outil de développement Mplab. Une fois le fichier exécutable est généré par Mplab il est intégré au logiciel Proteus pour simuler son exécution sur la carte principale.

## 3.1 Organigramme principal

Cet organigramme est composé de deux branches, une branche pour la saisie de la consigne et l'autre pour la régulation. Au reset le programme configure le microcontrôleur et teste le commutateur K qui doit être au niveau bas. Deux possibilités se présentent alors :

### **K = 0**

Le programme exécute la saisie et l'affichage de la température de consigne  $T_c$ . Cette procédure est expliquée plus loin.

### **K = 1**

Le programme exécute la régulation du four en boucle fermée.

Si l'utilisateur décide de changer la consigne il doit placer K au niveau bas et faire un reset.

Les valeurs limites  $T_{sup}$  et  $T_{inf}$  sont déterminées à partir de  $T_c$ . Le choix de ces limites est inhérent au comportement dynamique du process.

Pour notre cas on les valeurs suivantes :

$$T_{sup} = T_c + 3^{\circ}\text{C} \quad \text{et} \quad T_{inf} = T_c - 3^{\circ}\text{C}$$

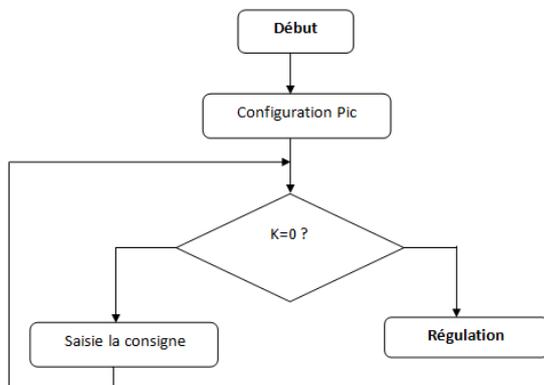


Figure 3.8 : Organigramme principal.

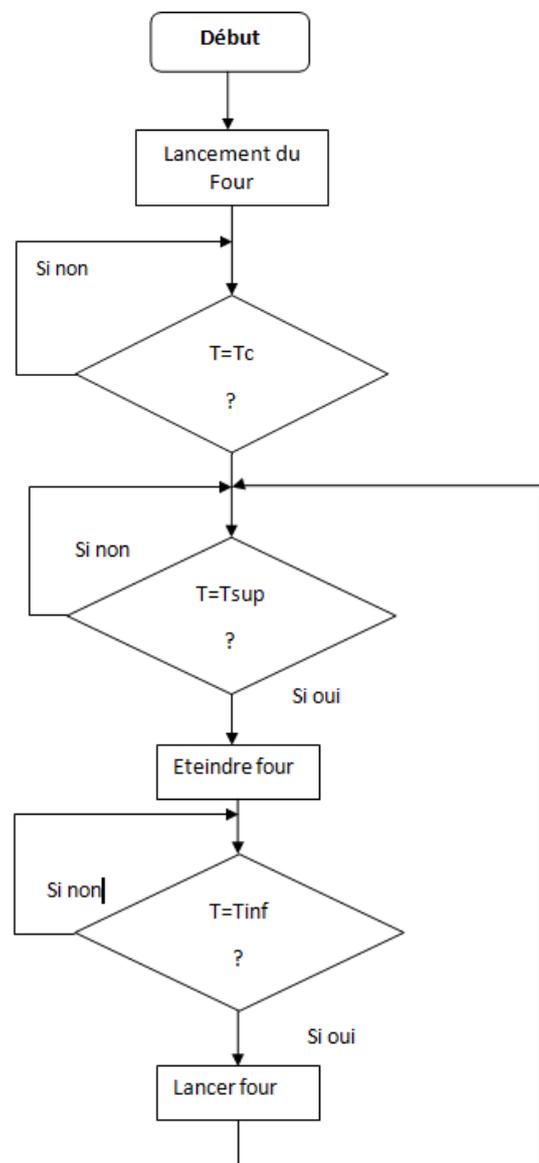


Figure 3.9 : Organigramme de régulation.

### 3.2 Configuration du pic 16f877A

Dans ce module on configure les ports d'entrée/sortie ainsi que le convertisseur A/N. Nous avons deux signaux analogiques à traiter, le signal  $T_C$  et le signal de mesure  $T_m$  issue du capteur de température.

Le signal  $T_C$  est affecté au canal AN0 (pin RA0)

Le signal  $T_m$  est affecté au canal AN1 (pin RA)

Le fonctionnement du convertisseur est configuré par les registres ADCON0 et ADCON1.

#### Le registre ADCON1

Ce registre permet de programmer :

- l'ajustement du contenu des registres ADRESH et ADRESL,
- le choix des tensions de références
- le choix entre le PORTA et le PORTE des lignes logiques et analogiques.

D'où la configuration :

Ajustement : **à droite**

Tensions de références : **internes**

RA0, RA1 : **entrées analogiques**

Soit le mot de configuration : **10000100**

Cette configuration est valable pour les deux voies analogiques : AN0 et AN1

#### Le registre ADCON0

Ce registre permet de programmer :

- l'horloge d'échantillonnage,
- la mise en service du convertisseur,
- lancement/arrêt de l'échantillonnage,
- le choix du canal (signal) à convertir.

D'où la configuration:

- Horloge échantillonnage : dépend du quartz,

$F_{OSC} = 4 \text{ Mhz}$  alors le diviseur = 8 : bits **ADCS1 ADCS0 = 01**

- Mise en service : bit **ADON = 1**
- Lancement/arrêt échantillonnage :

Bit **Go/Done = 1** : échantillonnage

Fin échantillonnage, remise à zéro automatique : bit **Go/Done = 0**.

- Choix du canal à échantillonnage :

Canal AN0: bits **CHS2 CHS1 CHS0 = 000**

Canal AN1: bits **CHS2 CHS1 CHS0 = 001**

Le mot de configuration à inscrire dans le registre ADCON0 dépendra de la voie à échantillonner.

### 3.3 Temporisation

Le procédé de chauffage d'un four présente une grande inertie. Les temps de chauffage se mesurent en dizaines de minutes, alors que les durées d'échantillonnage se mesurent en quelques microsecondes. Pour éviter de faire l'acquisition d'échantillons qui n'apportent aucune nouvelle information (on fait plusieurs lectures successives alors que la température n'a pas évolué), on insère une temporisation entre deux lectures successives. Ce temps estimé à quelques secondes, il est déterminé à partir des paramètres du procédé.

On utilise le registre timer TMR1 de 16 bits pour temporiser de longues périodes.

#### Remarque :

Lors de l'acquisition de la consigne, les lectures sont immédiates (pas de temporisation) car l'utilisateur a besoin de l'information en temps réel (affichage sur LCD).

### 3.4 La consigne

Ce paramètre est obligatoire dans une régulation industrielle. Il doit être fixé avant le lancement du procédé, dans une procédure à part. A cet effet nous utilisons un potentiomètre linéaire pour injecter une tension  $V_C$  sur le canal AN1, d'où la procédure de réglage suivante :

K : commutateur

K = 0 : informe pic procédure réglage consigne : **action utilisateur**

Injection  $V_C$  sur AN1 : **action utilisateur**

Reset pic : **action utilisateur**

Lecture et affichage  $T_C$  sur LCD : **microcontrôleur**

Retouche potentiomètre : **action utilisateur** (car consigne désirée pas encore atteinte)

Lecture et affichage  $T_C$  sur LCD : **microcontrôleur**

**Consigne atteinte alors:**

K = 1 : informe pic démarrage régulation.

Avec une interface graphique sur PC et une liaison série avec le microcontrôleur, cette procédure se simplifie. La valeur de  $T_C$  est saisie sur le moniteur et transmise en série au microcontrôleur.

### 3.5 Simulation

Afin de vérifier le programme avant de le transférer dans le microcontrôleur, nous avons effectué des simulations à l'aide du logiciel ISIS PROTEUS. Les tests effectués servent à vérifier le bon déroulement du programme. Sur la capture d'écran de la figure suivante l'élément chauffant est à une température basse (couleur bleu).

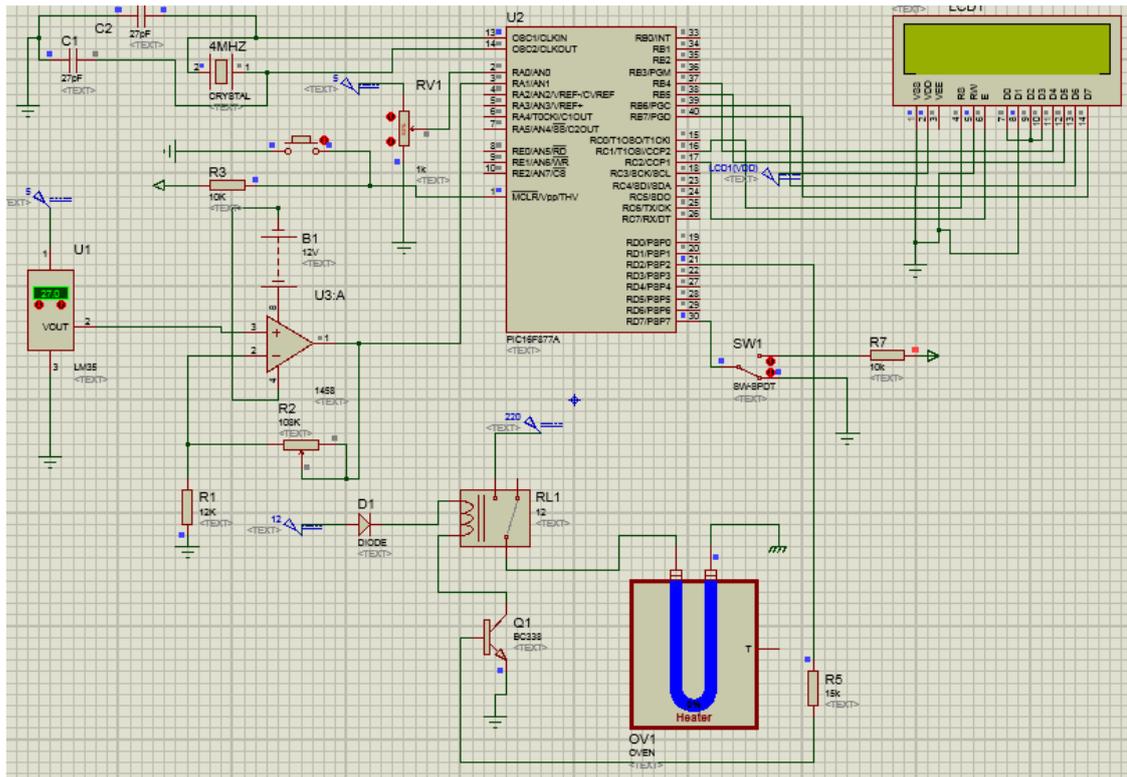


Figure 3.10: Simulation avec ISIS PROTEUS.

### Transfert du programme vers le microcontrôleur

Après les tests, nous transférons le programme vers le microcontrôleur pour procéder aux essais pratiques, pour cela nous avons utilisé un logiciel PICKIT2. Ce programme permet en particulier de transférer le fichier compilé (.hex) à l'aide de Mplab vers le PIC. Après avoir été détecté par le logiciel, nous lui transférons le fichier concerné (.hex) et enfin nous procédons à une vérification (verify) qui nous permet de bien confirmer le transfert complet du programme vers le PIC.

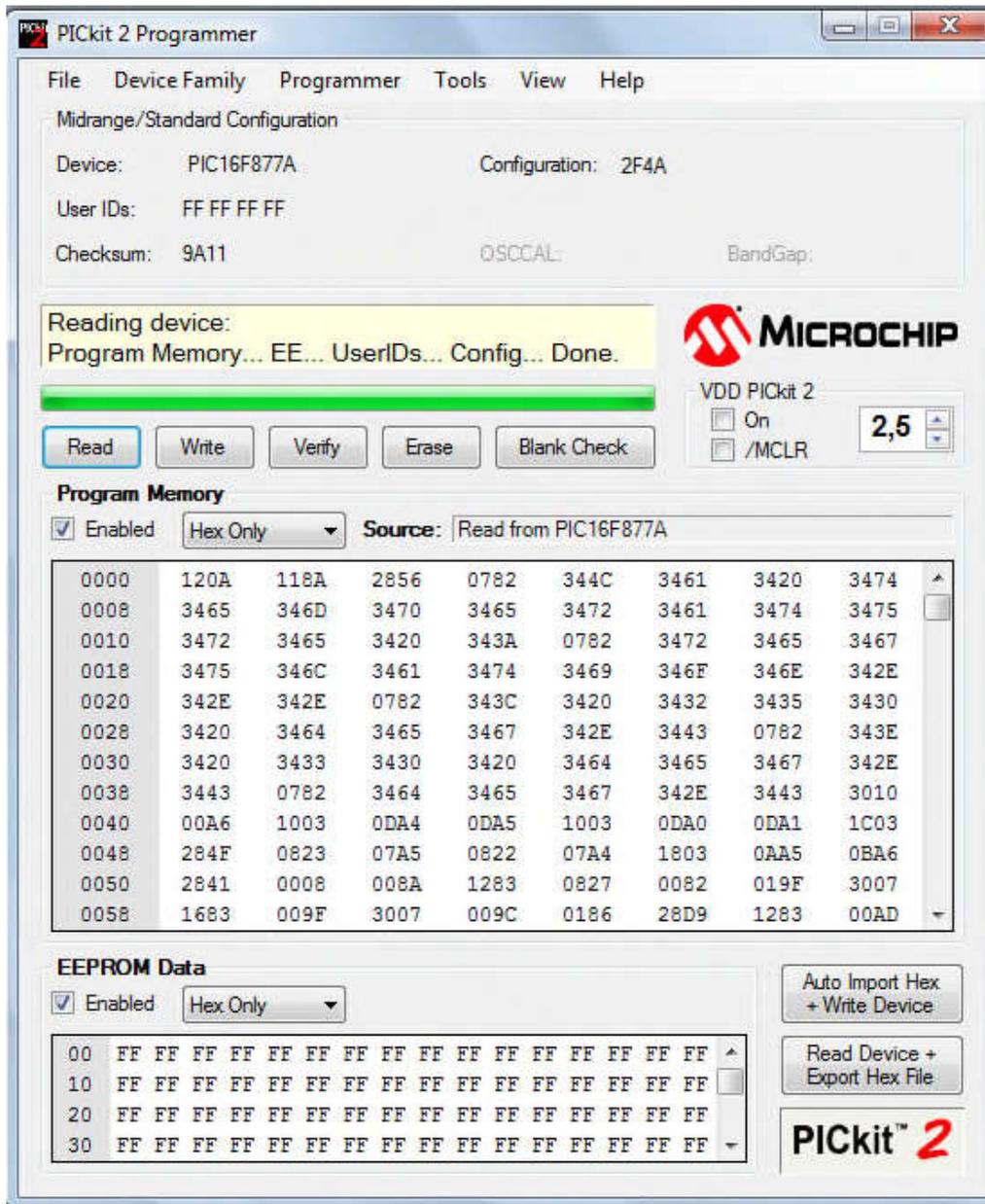


Figure 3.11 : Vue de logiciel PICkit2.

## 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les différentes étapes de conception et de réalisation des différents circuits électroniques. Nous avons également expliqué la réalisation du circuit de puissance ainsi que l'utilisation du programmeur de PIC de type USB pour relier éventuellement le PIC au PC afin de le programmer.

## Conclusion Générale

---

Notre objectif dans ce présent travail consiste en la conception et la réalisation d'une carte de commande à base d'un PIC 16F877A, en vue d'améliorer le contrôle et le maintien de la température à l'intérieur du four électrique.

Nous avons présenté les fours électriques et détaillé celui que nous ayons utilisé à l'aide du capteur de température LM35DZ.

Nous avons réalisé la carte d'alimentation, les circuits d'amplification et de puissance ainsi que la carte à base du PIC 16f877A. Les essais pratiques ont permis de vérifier le bon fonctionnement du dispositif réalisé. Le programme a été développé en C sur mplab et simulé avec proteus sur le système de régulation.

L'algorithme à hystérésis peut résoudre certains problèmes de régulation qui n'exigent pas une grande précision. Lorsqu'une meilleure précision et une plus grande stabilité s'imposent il faut passer à des algorithmes plus évolués tel que PID simple et multi-boucles.

Nous avons pu constater durant ce projet, que la technique de commande numérique que nous avons utilisées, convient mieux au système à cause de sa grande inertie thermique. De plus la commande numérique est plus flexible que la commande analogique grâce aux avantages qu'elle représente :

- Il y'a moins de dépendance entre la partie matérielle du régulateur et la loi de réglage.
- Pour modifier la régulation, il suffit d'agir sur le programme sans toucher aux composants.

## Bibliographie

---

- [1] JACUBOWIEZ Isidore, « les fours industriels » "Techniques de l'ingénieur Chaudières et fours industriels", année 1998, "réf. article : be8842".
- [2] C. Rigollet. Etude des fours électriques à résistance utilisés dans les laboratoires. J. Phys. Radium, 1934.
- [3] BOURGEOIS, Jean-François and GIRAULT, Alain and JAUME, Richard and LE BOULCH, Marianne et OBERLIN Claude, « Fours électriques à résistances Présentation générale », réf. article : d5910.
- [4] Claude Leroux, « Classification des fours de traitement thermique », journal Traitements & Matériaux 427 Mars - Avril 2014.
- [5] BTS SN, « Apport de connaissances sur les capteurs de température », Lycée CHEVROLLIER, séance 2, 10/10/2014.
- [6] JEAN-CLAUDE Engrand, « Métrologie industrielle » partie1.
- [7] DOSSOU Charles, « Etude des fours électriques ».
- [8] BTS CIRA 1, « régulation industrielle », Lycée Rouvière.
- [9] SOYED Abdessami, « Asservissement et Régulation ».
- [10] CHRISTOPHE Durand, « Cours de Microcontrôleurs », Filière Informatique Industrielle et Instrumentation, Polytech' Grenoble, Université Joseph Fourier.