Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etude pour l'obtention du diplôme de Master académique

Domaine : sciences et technologies

Filière : génie des procédés

Spécialité : génie des procédés des matériaux

Thème

REALISATION ET CARACTERISATION DE MINI-FOUR POUR CERAMIQUE

Présenté par : BENALI Assia

BOULALA Amina

Devant Les jurys : président : M^dm *FARHAT Samira*

Examinateur : M^r ALOIOUI Ridha

En cadré par : M^r BENREKIYA Ahmed-Ridha

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Avec l'aide de dieu tout puissant, nous pouvons accomplir ce modeste travail

Ce travail de du mémoire n'a pu voir le jour sans l'appui et le soutien de nombreuses personnes que nous souhaitons ici vivement remercier monsieur ****BENREKIA Ahmed-Ridha**** *notre en cadreur.*

Pour ces correction évolutive du travail ainsi que l'esprit de recherche madame ****FARHAT Samira****. *Pour l'honneur qu'il ne fait en acceptent la présidence du jury Monsieur** ***ALOIOUI Ridha****pour avoir accepte de juger ce travail nôtre enseignants et camarades de l'année théorique notre parant qui ont tout fait pour nous permettrons la réussite dans la vie.*

- *Tous les amis.*



Dédicace

- *A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :*
- *A la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie ma mère qui ma apporté son appui durant toutes mes années d'étude, pour son sacrifice et soutien qui m'ont donné confiance, courage et sécurité.*
- *Amon cher père qui ma appris le sens de la persévérance tout au long de mes études, pour son sacrifice ses conseils et ses encouragements.*
- *A ma très chère soeur rania*
- *A toute la famille BENALI et AISSAOUI*



Assia

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon père qui je pence serais très fière de moi, à mon adorable la maman, qui a toujours sume réconforter et encourager à mes adorable sœurs et beau-frère et leur enfant, à mon mari qui m'as toujours encouragé et qui a été compréhensif et patient, a tout la famille et tous mes amés à tous les étudiants de ma promotion.



Amina

Liste des figures

Chapitre 1 : généralité sur les produit céramique

Figure 1.1: Etapes de la voie de synthèse sol-gel.

Figure 1.2: système Four cylindrique vertical.

Figure 1.3 : Les fours dits « cabines » à tubes horizontaux.

Chapitre 2 : les éléments du four

Figure 2.1 : Photographie de mini-fours.

Figure 2.2 : photographie du chauffage à gaz.

Figure 2.3 : Photographie de mini-fours à chauffage électrique.

Figure 2.4: Schéma d'isolation thermique.

Figure 2.5 : le beurre fondu dans un bain-marie.

Figure 2.6 : photographie d'un plaque de carbone : 500*170*15mm.

Figure 2.7 : la Températures de fusion de certaines substances réfractaires [ALIPRANDI, 1989].

Figure 2.8 : Photographie de la laine de verre.

Figure 2.9 : Photographie de l'intérieur d'un four à parois internes en matériau réfractaire.

Figure 2.10 : photographie de foyer à chauffage électrique.

Figure 2.11 : photographie de foyer à chauffage à gaz.

Figure 2. 12 : Photographie du creuset en terre cuite.

Liste des figures

Chapitre 3 : le chauffage

Figure 3.1 : représente le circuit série a refaire.

Figure 3.2 : représente le circuit parallèle

Figure 3.3 : la Température de la flamme en fonction de l'excès d'air.

Figure3.4 : Régulateur de température d'un four à gaz.

Figure 3.5 : représente un régulateur de température.

Figure3.6 : Un Régulateur de température Marche-Arrêt.

Figure 3.7 : régulateur de température PID.

Figure 3.8 : représente le schéma de fonctionnent d'une régulation de température.

Figure 3.9 : représente un régulateur de température avec afficheur numérique.

Figure 3.10 : photographie du four inox anti trace.

Chapitre 4 : le bilan d'énergie et l'énergie fournie.

Figure 4.1 : schéma descriptif d'un four a induction.

Figure 4.2 : schéma la répartition des technologies de refroidissement du clinker en fonction du volume de clinker produit.

Figure 4.3 : refroidisseur a grilles incliné à suspension pendulaire.

Figure 4.4 : représente un refroidisseur conventionnel à grilles : coupe longitudinale.

Figure 4.5 : représente un refroidisseur à deux plans de grilles inclinés pour une capacité de 4 000 t/j.

Figure 4.6 : représente un refroidisseur plan de grilles horizontal en aval pour une capacité de 5 000 t/j.

Résumé

Les fours modernes comportent tous une enveloppe métallique généralement fortement charpentée, à l'intérieur de cette enveloppe. En dispose plusieurs couches de matériaux isolants et réfractaires, qui pour le but de limiter la déperdition thermique et de protéger l'espace environnementale et le personnel d'exploitation.

Dans notre étude on à basé sur les compositions du four à laboratoire et le rôle de chacune dans la structure et le fonctionnement du four à partir de ses qualités et le prix qui doit être raisonnable aussi le pouvoir environnementale pour chauffer des produits céramique à certain température.

Abstract

Modern's furnaces all have à metal casing generally strongly. Structured inside this casing there is several of insulating and refractory materials, which aim to limit heat loss and protect the environment and the operating personnel.

In our study we based on the composition of the furnaces and the role of each one in the function of the furnace from its qualities and the price which must also be responsible and its impact on the environment to heat ceramic materials at a certain temperature.

الملخص

تحتوي الأفران الحديثة على أغلفة معدنية عموما بنيت بإحكام، بداخل هذا الغلاف نجد العديد من المواد العازلة و المقاومة للحرارة بهدف الحد من الهذر الحراري و لحماية الفضاء البيئي و الأشخاص الموجودين في الميدان.

وفي دراستنا ركزنا على مكونات الأفران المخبرية و دور كل مكون في بنية و وظيفة الفرن من خلال النوعية و السعر، و كذلك التأثير البيئي من اجل التمكن من تسخين السيراميك عند درجة حرارة معينة.

Sommaire

Introduction générale 1

chapitre 1: généralité sur les céramique

1_INTRODUCTION: 2

2_CLASSIFICATION DES CERAMIQUES DE TYPE PZT :.....2

2_1_Deffinition D'un PTZ : 2

2_2 Titanate De Plomb Pbtio3 :.....3

2_3_Zirconate De Plomb PbZrO3 : 3

2_4_ La Solution Solide Titanate- Zinconate De Plomb Pb (Zr ,Ti)O3 : 3

3_ PROPRIETES GENERALES DES CERAMIQUES :.....4

3_1_Liaison Et Structure : 4

3_2_ Microstructure Et Propriétés :.....4

4_METHODE DE PREPARATION : 4

4_1_ Méthode Céramique:.....4

4_2_Méthode Sol-Gel :.....5

4_3_ Méthode Hydrothermale : 5

4_4_Methode Du Précurseur : 6

4_5_ Synthèse Micro-ondes: 6

5_GENERALITES SUR LES FOURS [11] : 6

5_1_Classification : 7

5_1_1_Fours Continus Et Fours Discontinus:.....7

5_1_2_ Chauffage direct et chauffage indirect : 7

5_2_ Principaux Types De Fours: 8

5_3_Les Eléments Des Fours : 9

chapitre 2: les elements des fours

1_CARCASSES DU FOUR: 11

Sommaire

2_ISOLATION THERMIQUE:.....14
2_1_ Définition.....14
3_LA RESISTANCE THERMIQUE: 14
3_1_ Définition De La Resistance Thermique : 15
3_2_ Principes De La Resistance Thermique:.....16
4_Quelques Isolants Thermiques :.....17
4_1_ Terre Réfractaire:.....17
5_LAINE DE VERRE:.....20
5_1_Description:.....20
6_PAROIS INTERNES :.....20
7_FOYER DU CHAUFFAGE:.....21
8_CREUSET :.....22

chapitre 3: carcasses des fours

1_DÉFINITION:.....25
2_ LES DÉFÉRENTES MODES DE CHAUFFAGE:.....25
2_1_Le chauffage électrique : 25
2_2_Le Chauffage Par Induction:.....26
2_3_Le Chauffage A Gaz : 30
2_3_1_ Composition du gaz naturel :.....30
2_3_2_Les équations de la réaction de combustion des différents éléments :..31
2_3_3_Les Avantages Et Les Inconvénients :.....31
3_COMBUSTION A L'INTÉRIEUR DU FOUR:.....31
3_1_Influence De L'excès D'air Sur La Température De La Flamme : 31
4_REGULATION THERMIQUE: 32
4_1_ Fonctionnement Du Régulateur De Température :.....32
4_2_ Qu'est-ce qu'un contrôleur de température? 33
4_3_ Les différents types de régulateurs de température, leurs fonctionnent :....34

4_4_Principe d'une régulation de température :.....36
4_5_Régulateur de température avec afficheur numérique :.....37
4_6_La minuterie :.....37

chapitre 4: Le Bilan Energie et L'énergie Fournie dans un four

1_ LE BILAN D'ENERGIE :.....40
1_1_ Définition :.....40
1_2_ Le Bilan Energie Pour Un Chauffage A Gaz :.....40
1_3_Le Bilan Energie Pour Un Chauffage électrique :.....40
1_4_ Le Bilan Energie Pour Un Chauffage par induction :.....41
2_ L'ENERGIE FOURNIE :.....42
2_1_ Définition :.....42
2_2_ L'énergie Fournie Par Gaz :.....42
2_3_ L'énergie Fournie Par Induction :.....42
2_4_ Energie Fournie Par L'électricité :.....42
2_4_1_La Loi De Joule :.....43
3_ LE CHAUFFAGE DE L'ATMOSPHERE DU FOUR PAR CONDUCTION :44
3_1_Flux De Chaleur Echange Par Conduction.....44
3_2_ Transfert De Chaleur Par Conduction :.....45
4_ LE TRANSFERT D'ENERGIE ATMOSPHERE DU FOUR CREUSET 46
5_ CHAUFFAGE DES MATERIAUX ET FUSION :.....47
5_1_Thermodynamique.....47
5_2_Caractéristiques :.....48
6_ LE REFROIDISSEMENT DU FOUR :.....48
6_1_Le Retournement De Tendance Est Tel Que Désormais :.....49
6_2_Le Dimensionnement Du Refroidisseur :.....50
6_3_Le Mode De Supportage Du Plan De Grille :.....51
6_3_1_Les Refroidisseurs Pendulaires.....51

6_3_2_Les refroidisseurs conventionnels 51
Conclusion générale.....55

Introduction général

Introduction générale

Un four est un outil 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.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉ SUR LES CÉRAMIQUES

1. INTRODUCTION:

Le mot céramique désigne essentiellement les poteries, porcelaine, brique. Il représente actuellement l'ensemble des matériaux inorganique non métallique **[1]**.

Les céramiques sont a base d'oxydes (Al_2O_3, ZrO_2, CaO, TiO_2,…etc) ou des composés chimique comme SiC, WC,…etc. Ce sont des matériaux qui conduisent à des températures supérieurs à 900°C à la formation d'un solide macroscopique homogène **[2]**. La structure et la microstructure sont définies lors du cycle d'élaboration, qui transforme des matières premières le plus souvent pulvérulentes en un matériau dense, idéalement exempt de pores **[3]**. Ce sont des poly cristaux qui sont fabriqués par frittage d'un mélange d'oxyde et que leur procédé de fabrication peut être modulé comme leur composition afin d'ajuster leurs performances diélectriques, mécaniques et piézoélectriques.

Les propriétés des céramiques vont dépendre de leur microstructure, c'est à dire la morphologie, la nature des phases présente et la qualité de la surface **[4]**. Les principales utilisations de ces matériaux concernent toute l'instrumentation électroacoustique: émission et détection des ultra–sons, microphones, télécommandes, générateurs d'impulsion, …etc. **[1]**.

2. CLASSIFICATION DES CERAMIQUES DE TYPE PZT :

2.1 Définition d'un PTZ :

Les PZT, ou titano-zirconates de plomb, sont des composés chimiques de formule $PbZrxTi1-xO_3$, où $0 \leq x \leq 1$. Il s'agit de céramiques de structure pérovskite présentant plusieurs propriétés intéressantes :

- ferroélectricité, c'est-à-dire qu'elles ont une polarisation électrique spontanée, qui peut être inversée par l'application d'un champ électrique ;
- piézoélectricité, c'est-à-dire qu'elles peuvent changer de forme si on leur applique un champ électrique, ou qu'elles peuvent générer une tension électrique entre deux faces lorsqu'on leur applique une déformation propriété particulièrement utile pour les capteurs, les transducteurs, les actionneurs au sens large, etc. ;

- pyroélectricité, c'est-à-dire qu'elles peuvent générer une tension électrique lorsqu'on modifie leur température, d'où des applications dans les sondes de température.

2.2 Titanate de plomb $pbtio_3$:

Le titanate de plomb est une substance ferroélectrique qui est obtenue par réaction entre le bioxyde de titane TiO_2 et l'oxyde de plomb a la température 350°C. A température ambiante le titanate de plomb possède une structure quadratique de paramètres a = 3.899 Å et c = 4.153 Å et le groupe d'espace P4/mm. Le rapport c/a de 1.06 indique que cette structure possède une distorsion relativement importante par rapport à la structure pérovskite. Ce matériau est caractérisé à 450°C par un constant diélectrique élevé de 2000. Au delà du point de curie (TC = 490°C), il devient para électrique et possède une structure cubique dont le paramètre a est égal à 3.960 Å à 535°C.

2.3 Zirconate de plomb $pbZrO_3$:

Le zirconate de plomb est obtenu par réaction des deux oxydes de base PbO et ZrO_2.
Cette réaction commence des 750°C et est complète à 900°C **[5]**. La zirconate de plomb possède une structure orthorhombique de paramètre:
a = 5.88 Å, b = 11.78 Å, c = 8.21 Å et de groupe d'espace Pbam. Cette variété est anti ferroélectrique, stable à basse température et elle subit une transition vers une autre variété cristalline para électrique, de symétrie cubique,
à T = 230°C. Cette dernière est appelé température de curie Tc.

2.4 La solution solide titanate- zinconate de plomb Pb (Zr, Ti) O_3 :

La substitution partielle des ions zirconium par des ions titane dans PbZrO3 entraîne la formation d'une solution solide de formule Pb (Zrx, Ti 1-x) O_3. Cette substitution et fait apparition deux nouvelle phases ferroélectriques en dessous de la température de curie qui en fonction de la valeur de x **[6]**. La PZT présente une structure quadratique lorsque x est supérieur à 0.55 et rhomboédrique dans le cas contraire **[7]**. La frontière entre ces deux phases est appelée frontière morpho tropique de phases (F.M.P). La solution solide de zirconate-titanate de plomb sont ferroélectrique, donc douées d'une polarisation spontanée électrique et par conséquent piézoélectrique.

3. PROPRIETES GENERALES DES CERAMIQUES :

3.1 Liaison et structure :

Les éléments qui entrent dans la composition des céramiques sont liées entre eux par des liaisons fortes, covalentes ou ioniques, et forment des composes hétéro polaires.

Les liaisons ioniques et covalentes impliquent tous les électrons libres: les céramiques sont dans l'ensemble de mauvais conducteurs de l'électricité et de la chaleur; on les utilise fréquemment comme diélectrique et comme isolant thermique. Certaines céramiques présentent également des propriétés piézoélectrique et ferroélectrique **[8]**.

3.2 Microstructure et propriétés :

Les propriétés mécaniques des céramiques dépendent, dans une large mesure, des matières premières employées, ainsi que des méthodes de fabrication qui fixent les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases présentes.

Pendant l'étape de frittage, il y a un soudage des particules par diffusion à l'état solide et une diminution graduelle de la porosité.

Un contrôle précis de la qualité des matières premières, de leur composition, de leur granulométrie et des paramètres de frittage permet l'obtention des céramiques entièrement cristallines et non poreuses **[9]**.

4. METHODE DE PREPARATION :

Il y a plusieurs méthodes de synthèse dont en va citer quelques unes avec les applications :

4.1 Méthode céramique:

La méthode céramique consiste à chauffer le mélange de plusieurs solides pour les faire réagir et former le produit désiré. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie et au laboratoire. La simple méthode céramique présente plusieurs inconvénients:

Elle met en jeu de haute température qui nécessite des grandes quantités d'énergie.

La lenteur des réactions à l'état solide, le temps de réaction se mesure en heures, et le déroulement des réactions dépend largement du cycle thermique.

L'hétérogénéité de composition du produit final.

Afin d'éviter ces inconvénients et synthétiser un produit avec la composition

désirée, il est donc important que les matériaux de départ soient bien broyés pour réduire la taille des particules et qu'ils soient très bien mélangés pour avoir une surface de contacte maximum et réduire la distance de diffusion des réactifs, souvent le mélange réactionnel est prélevé après une calcination préliminaire et rebroyé à nouveau pour renouveler les surfaces en contact et ainsi accélérer la réaction **[10]**.

4.2 Méthode sol-gel :

Cette méthode a été développée dans la période 1950-1960, lorsqu'on s'est aperçu que les colloïdes forment de très petites particules (de diamètre de 1 à 1000nm), chimiquement très homogènes.
Un sol est une suspension de particules colloïdales dans un liquide; les particules ont typiquement un diamètre de 1 à 1000nm. Un gel est un solide semi rigide où le solvant est retenu prisonnier dans le réseau du matériau solide qui peut être colloïdal. Pour synthétiser des solides avec le procédé sol-gel, un solide doit d'abord être préparé dans un liquide convenable.

La préparation du sol peut être simplement la dispersion d'un solide insoluble ou l'addition d'un précurseur qui réagit avec le solvant pour former un produit à l'état colloïdal.
Le sol est ensuite traité ou simplement laissé pour former après un gel. Ce dernier est chauffé pour obtenir le produit final. Le chauffage sert à plusieurs choses : il permet d'éliminer le solvant, le réarrangement de la structure du solide et sa cristallisation. Les principales étapes du procédé sol-gel sont résumées sur la figure (1.1).

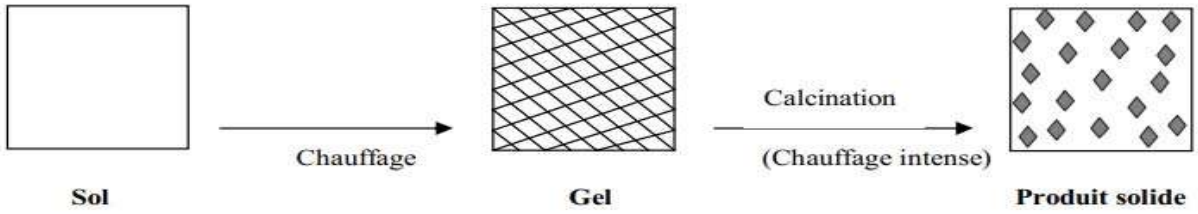


Figure 1.1: Etapes de la voie de synthèse sol-gel.

4.3 Méthode hydrothermale :

La méthode hydrothermale consistait à chauffer des réactifs en présence d'eau dans un récipient clos, un autoclave. Dans ce récipient, la pression augmente et l'eau surchauffée reste liquide au dessus de son point d'ébullition

normal, 373K. Dans les conditions hydrothermales, la température est élevée au-dessus du point d'ébullition de l'eau.

L'utilisation de plus basse température est l'un des avantages de cette méthode. La méthode est utile pour des oxydes métalliques qui ne sont pas soluble dans l'eau à pression atmosphérique, mais qui le deviennent dans l'eau surchauffée du dispositif hydrothermal. Même si la température et la pression sont insuffisantes pour dissoudre les matériaux de départ, on peut ajouter des sels de métaux alcalins dont les anions formant des complexes permettant de solubiliser le solide.

4.4 Méthode du précurseur :

Dans la méthode du précurseur, on réalise le mélange au niveau atomique par formation d'un solide, le précurseur, dans lequel les éléments métalliques du composé désiré sont présents dans la stœchiométrie correcte. Par exemple, pour un oxyde MM'_2O_4, on forme un sel mixte d'un oxyacide, tel un acétate, contenant les cations M et M' dans le rapport 1 : 2. Le précurseur est ensuite chauffé pour qu'il se décompose en formant le composé souhaité. Des produits homogènes sont ainsi formés à des températures relativement basses. L'inconvénient est qu'il n'est pas toujours possible de trouver un précurseur convenable.

4.5 Synthèse micro-ondes:

La cuisson des aliments est un exemple d'utilisation du rayonnement micro-onde pour accélérer la vitesse de réaction. Cette méthode a été récemment appliquée à la synthèse de matériaux à l'état solide, tels des oxydes mixtes. L'utilisation du chauffage micro-onde dans la synthèse à l'état solide impose qu'au moins un des réactifs absorbe le rayonnement. La vitesse du processus est alors augmentée à la fois par accroissement de la vitesse de réaction à l'état solide et de la vitesse de diffusion.

5. GENERALITES SUR LES FOURS [11] :

Un four est une pièce d'équipement dans laquelle la chaleur dégagée par la combustion de fuel oïl ou gaz combustible par l'intermédiaire de brûleurs, est transféré à un fluide (l'huile chaude par exemple) passant dans des tubes.

Le combustible est brûlé sous des conditions contrôlées dans une chambre appelée : chambre de combustion. La chaleur dégagée est transmise à travers la paroi des tubes au produit. Ces tubes sont placés généralement le long des murs

et au plafond du four. Les produits de combustion s'échappent du foyer vers l'atmosphère par l'intermédiaire d'une cheminée.

5.1 Classification :

Toute classification est arbitraire, elle est toutefois utile dans la mesure où elle permet de retrouver des caractéristiques communes à des équipements, à première vue, très différents.
Nous proposons ici deux classifications, en fonction :

- ✓ De la manipulation du produit : fours continus ou discontinus.
- ✓ Du procédé de chauffage : direct ou indirect.

5.1.1 Fours continus et fours discontinus:

C'est la manutention et la circulation du produit qui est ici le critère.

- ✓ Dans un four continu, le produit à chauffer entre à une des extrémités et en ressort à l'autre.
- ✓ Dans un four discontinu, le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit.
  Cette différence dans la manutention entraine des différences notables du point de vue thermique.
- ✓ Dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température.
- ✓ Dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit.

5.1.2 Chauffage direct et chauffage indirect :

Le critère est ici est le contact entre le produit et les gaz issus de la combustion.

- ✓ **Fours à chauffage direct :** il ya contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. du point de vue thermique, cela entraine qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection.
- ✓ **Fours à chauffage indirect :** l'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge.

5.2 Principaux types de fours:

Il existe une grande variété de fours tubulaire qui diffèrent notamment par leur géométrie :

- ✓ Les fours cylindriques verticaux : Dans ces fours, les brûleurs qui sont situés sur la sole du four réalisent le mélange air-combustible et la combustion. Les flammes se développent dans la zone de radiation dans les tubes sont chauffés par rayonnement. Au sommet de la zone de radiation, la température des gaz de combustion est de l'ordre de 700 à 800°C et de ce fait le rayonnement est plus faible.

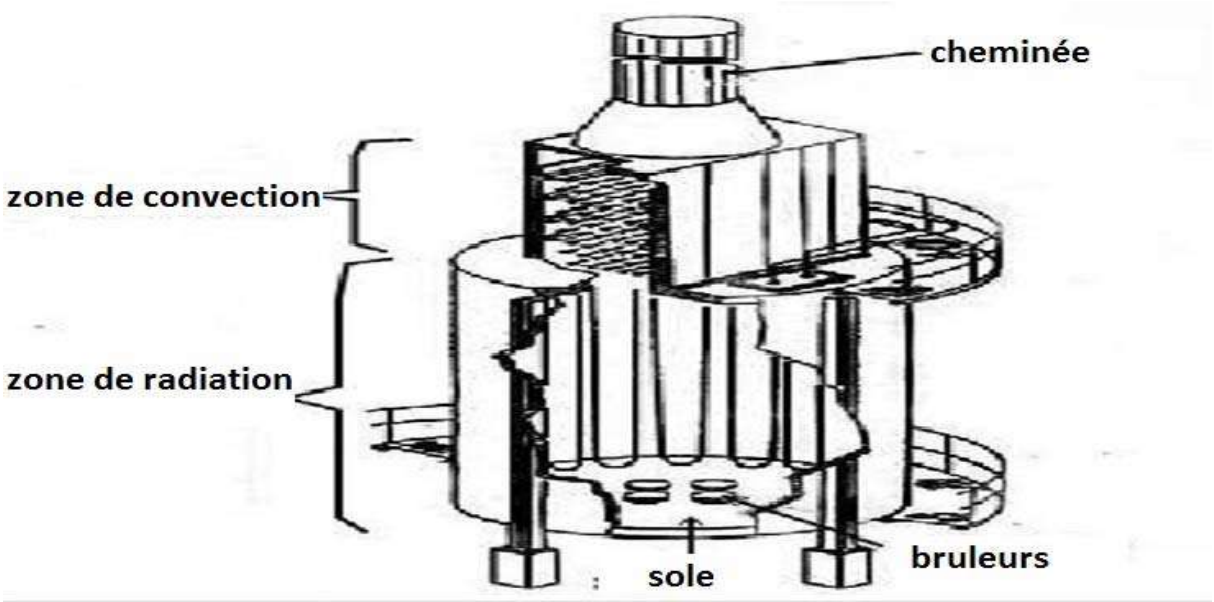


Figure 1.2: système Four cylindrique vertical.

- ✓ Les fours dits « cabines » à tubes horizontaux : Dans ces fours la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède, dont la plus grande longueur est horizontale. Les tubes sont placés horizontalement le long des parois latérales les plus longues. Les brûleurs sont situés sur la sole, ou sur la partie inférieure des murs latéraux les plus longs, ou encore sur les murs d'extrémités ne recevant pas les tubes

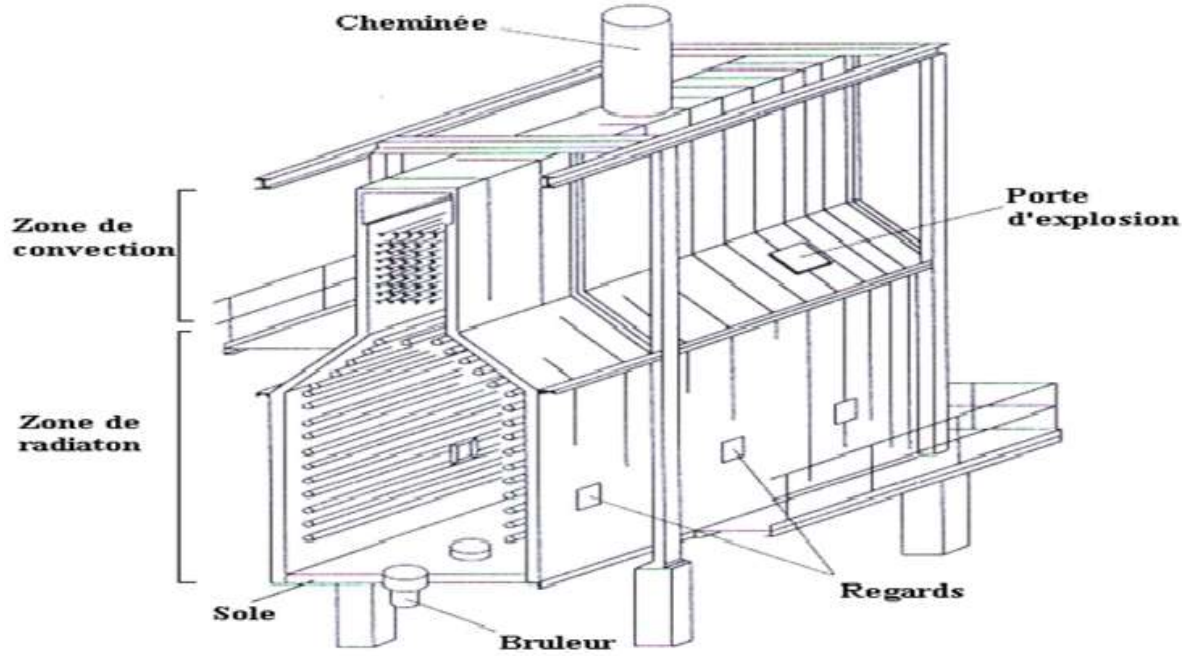


Figure 1.3 : Les fours dits « cabines » à tubes horizontaux.

5.3 Les éléments des fours :

En général, un four se compose de :

- ✓ **Une enveloppe métallique :** appelée « casing ».
- ✓ **Une zone de rayonnement :** formant une chambre de combustion, garnie intérieurement de matériaux réfractaires isolants.
- ✓ **Un faisceau tubulaire :** en zone de rayonnement et éventuellement en zone de convection.
- ✓ **Une zone de convection :** éventuellement garnie.
- ✓ **Une cheminée :** ou un carneau avec registre pouvant être garni (circuit fumées).
- ✓ **Des accessoires :** divers tels que : souffleurs, portes d'accès, portes d'explosion, regard, thermocouples…

CHAPITRE 2

LES ELEMENTS DES FOURS

Chapitre 2

I. LES ELEMENTS DU FOUR :

1. Carcasses du four:

C’est la couverture externe du four, elle est généralement fabriquée de tôles d’acier de forte épaisseur et spécialement conçue pour offrir une structure de résistances mécanique et thermique supérieures.

Les commandes du four sont à la portée de la main c'est-à-dire à l’extérieur du four. Elles comprennent :

- Un contrôle électronique de température, le control de température se fait à l’aide d’un régulateur de courant ou de débit du gaz selon qu’il s’agit d’un chauffage électrique ou à combustible.
- Un contrôle électronique de l’atmosphère du four, il se fait à l’aide de capteurs qui donne après analyse informatisée la nature des gaz dans le four
- Une minuterie, elle permet de contrôler la durée du fonctionnement du four.
- Un hublot transparent permettant un control visuel de l’intérieur du four, il en verre supportant une très haute température.



Figure 2.1 : Photographie de mini-fours.

1 : la minuterie, **2** : le régulateur de température, **3** : fenêtre transparente (hublot).



Figure 2.2 : photographie du chauffage à gaz.

1 : une flamme de gaz ,**2** : paroi interne du four



Figure 2.3 : Photographie de mini-fours à chauffage électrique.

1 : la laine de verre, **2** : paroi métallique ,**3** : support du four, **4** : la résistance électrique

2. Isolation thermique :

2.1 Définition : En thermique, un isolant thermique est un matériau ayant une faible conductivité thermique, c'est un matériau qui ne laisse pas passer la chaleur d'une source chaude à une source froide. Il garde au frais au réfrigérateur et il garde la chaleur au niveau du foyer du four.

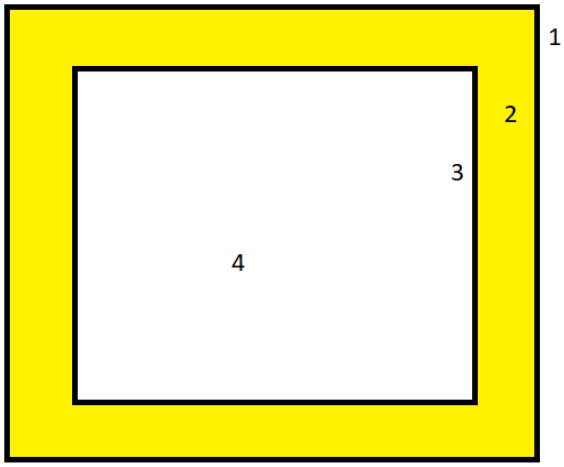


Figure 2.4: Schéma d'isolation thermique.

1 : Paroi externe, **2** : isolant thermique, **3** : paroi interne, **4** : L'intérieur du four

3. la résistance thermique:

- **Exemple :** soit du beurre à faire fondre dans un bain-marie, on observe que la température du beurre nommé milieu 2 est inférieure à celle de l'eau nommé milieu 2 en ébullition à 100 °C, ceci est dû au fait que le récipient contenant le

beurre présente une résistance thermique induisant une résistance thermique qui empêche le passage total de la chaleur de l'eau au beurre.



Figure 2.5 : le beurre fondu dans un bain-marie.

3.1 Définition de la résistance thermique :

La résistance thermique de conduction, aussi appelée résistance thermique conductive, d'un élément exprime sa résistance au passage d'un flux de conduction thermique. Cette résistance s'applique aux solides ainsi qu'aux fluides (liquide ou gaz) immobiles. Dans le Système international d'unités, elle est donnée en Kelvin par watt (K/W) 1 ou °C/W**.** Cette notion n'est valable qu'en régime stationnaire, le

régime transitoire faisant appel à la notion plus complexe de quadripôle thermique. La résistance thermique de conduction est l'inverse de la conductance thermique.

On donne la loi de la résistance thermique :

$$R = \frac{\Delta T}{W} \qquad (2.1)$$

ΔT : est la déférence de température entre le milieu 1 et le milieu 2.

W : est le flux de chaleur apporté au milieu 1.

3.2 Principes de la résistance thermique :

Il existe deux indices pour évaluer le pouvoir isolant d'un matériau :

Sa conductivité notée lambda : **λ,** elle évalue la capacité du matériau à conduire la chaleur. Plus l'indice lambda est faible, meilleur est l'isolant. La résistance thermique notée **R** : R = épaisseur du matériau / sa conductivité lambda.

$$R = e / \lambda \qquad (2.2)$$

e:l'épaisseur exprimée en mètre.

λ:conductivité thermique du matériau.

R évalue la conductivité du matériau pour une épaisseur donnée. Plus l'indice R est élevé, plus le matériau est isolant. R est exprimé en m^2k/W.

Il ne faut pas comparer les indices R de différents matériaux car le R est donné pour une épaisseur égale : Ce que signifie R, c'est que vous n'aurez pas besoin de la même épaisseur pour des matériaux différents. Un mur de briques d'épaisseur 10 cm est aussi résistant que 1 cm de laine de verre.

4. Quelques isolants thermiques :

4.1 Terre réfractaire :

Ce matériau résiste bien à la chaleur, le produit réfractaire sera requis pour des applications de chauffe intense avec cette qualité de constituer une enceinte thermique. Seront qualifiés de produits réfractaires tous les corps solides dont le point de fusion est particulièrement élevé. Cette température limite est située autour de 1800°C. Au-delà de cette limite, nous avons un produit dont les propriétés conviennent à une utilisation dans les environnements extrêmes comme, par exemple, le foyer de votre cheminée. Le domaine de la construction aura cette particularité de rechercher des matériaux réfractaires possédant une combinaison complexe de propriétés bien spécifiques telles que une haute dureté, une basse tension de vapeur, une faible vitesse d'évaporation, une résistance à certains milieux corrosifs, une résistance mécanique à haute température ainsi que des propriétés thermiques et électriques spécifiques. Le point de fusion est l'instant d'une réaction à l'échelle des atomes, où les particules se désordonnent et l'entropie augmente. L'énergie de cohésion qui les maintient liées semble directement venir du caractère de réfractairité. Nous nous intéresserons donc à la nature de la liaison chimique entre ces atomes.

- **Exemples :**

a- Briques et dalles réfractaires :

Les briques et les dalles réfractaires sont utilisées dans différents projets pour leur caractère réfractaire. Elles sont caractérisées par :

Teneur en alumine : 28 / 32% ou 39 / 42%

Domaine d'utilisation de 800°C à 1400° C (selon la teneur en alumine).

b- Mortier réfractaire :

Le mortier REFRACO a été optimisé pour s'associer parfaitement avec les boisseaux, les briques et les dalles réfractaires. De ce fait, il offre une excellente résistance thermique et pourra perdurer longtemps sans réclamer le moindre entretien. De plus, il est prêt à l'emploi et conviendra sur tous types de travaux qui font intervenir des matériaux nécessitant une haute résistance thermique. Il est caractérisé par : Riche en composants aluminiques. Selon les applications, on a :

Le REFRACTO sm (semi-réfractaire), 1000 °C pour le mortier REFRACO 1000 et mortier réfractaire REFRACO 1400 est utilisé pour des températures de l'ordre de1400°C.

c- Béton réfractaire :

Pour la réalisation de projets sur mesure qui nécessitent la mise en garde de contraintes techniques (fours ou foyers), le béton REFRACO est sans aucun doute le meilleur choix. Il est Facile à mettre en œuvre, il possède toutes les qualités requises pour ce type d'ouvrage : haute densité, gros agrégats et haute tolérance aux chocs thermiques.

d- Plaque Carbone :



Figure 2.6 : photographie d'un plaque de carbone : 500*170*15mm.

e- Les différentes variétés de matériaux réfractaires :

Les composants des produits réfractaires industriels, obtenus à partir de matières premières naturelles, capables de travailler dans les atmosphères de fours, font généralement partie de la famille des oxydes.
Il faut y ajouter les substances d'autres familles (carbures, carbone, nitrures, borures, etc.) utilisées telles quelles en termes de phase principale ou secondaire ou sous forme d'ajouts de faibles quantités (voir Figure 2.7). Cette figure montre la température de fusion des corps “ purs ” ; les réfractaires, généralement multiphasés, ont plutôt une fusion in congruente. La résistance pyroscopique ne suffit donc pas à différencier les produits et matériaux réfractaires. Il faut ainsi faire appel, pour les classer, à un critère propre à chaque matériau, sa composition chimique ou encore son moyen de mise en œuvre.

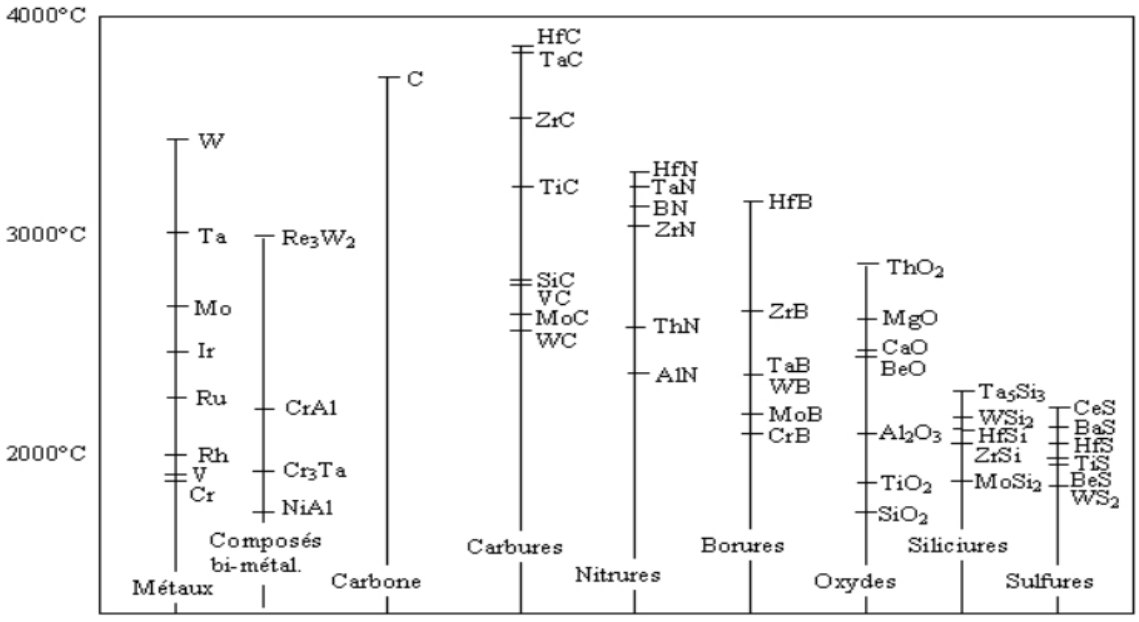


Figure 2.7 : la Températures de fusion de certaines substances réfractaires [ALIPRANDI, 1989].

5. Laine de verre:

5.1 Description : La laine de verre est un isolant fabriqué à partir du sable qui se présente sous la forme d'un matelas de fibres enchevêtrées emprisonnant de l'air immobile. Elle est utilisée en isolation thermique, en isolation phonique en correcteur acoustique ou dans la protection contre les incendies.



Figure 2.8 : Photographie de la laine de verre.

Elle est caractérisée par bon isolement thermique, acoustique, une bonne résistance au feu et elle est imputrescible. Cependant elle présente certains inconvénients, à savoir : effet cancérogène suspecté, tassements possibles et elle est difficilement recyclage.

6. Parois internes :

D'après le matériau à chauffer donc de la température d'utilisation on a des parois métalliques pour les basses températures à moins de 400 °C, ces parois sont en matériaux réfractaires, elles permettent ainsi l'isolation thermique et comme élément de support des capteurs (thermocouple, capteurs pour control de l'atmosphère interne du four). La figure 2.9 montre la photographie des parois métalliques d'un four et la figure montre la photographie des parois à matériaux réfractaire d'un four à Pizza à grande capacité de production.



Figure 2.9 : Photographie de l'intérieur d'un four à parois internes en matériau réfractaire.

1: paroi métallique interne de four de pizza.

7. Foyer du chauffage :

C'est l'espace où il la source de chaleur à savoir source à flamme ou à chauffage électrique voir figure (2.10) et (2.11) qui montrent respectivement un foyer à chauffage électrique et à chauffage à gaz.



Figure 2.10 : photographie de foyer à chauffage électrique.

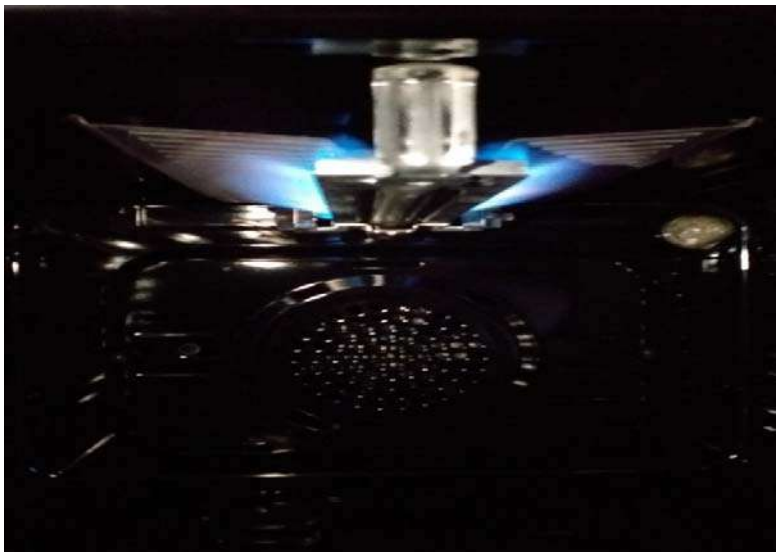


Figure 2.11 : photographie de foyer à chauffage à gaz.

8. **Creuset :** c'est l'élément qui contient le matériau à chauffer, il est généralement en terre cuite. Il est rigide et supporte les hautes températures. Il chimiquement inerte pour ne pas réagir même à haute température. La figure ci-dessous représente la photographie du creuset en terre cuite.



Figure 2. 12 : Photographie du creuset en terre cuite.

Conclusion :

Durant ce chapitre nous avons présentes les éléments des fours

CHAPITRE 3

LE CHAUFFAGE

I. CHAUFFAGE:

1. Définition :

Le chauffage est l'action de transmettre de l'énergie thermique d'une source chaude à une source froide, le transfert se fait directement par conduction ou à l'aide d'un fluide caloriporteur qui peut être un liquide : de l'eau, de l'huile ou simplement de l'air.

2. les déférentes modes de chauffage :

2.1 Le chauffage électrique :

Ce genre de chauffage se fait de deux manières la plus classique : Soit un courant électrique d'intensité I, il traverse un conducteur C, ce dernier chauffe. Cet effet thermique s'appelle effet joule. Il se fait par résistance électrique comme à la figure (2.3) suivant la loi de joule à savoir :

$$Q(t) = RI^2t \qquad (3.1)$$

Où

R : est la valeur de la résistance électrique qui s'exprime en Ohm (Ω)

I : l'intensité du courant électrique en Ampère (A)

T : la durée du chauffage en seconde (s).

Dans le système international Q s'exprime en Joule (J). Pour l'obtenir en calorie il suffit de diviser par le facteur de conversion calorie-Joule égal à 4.185.

Le second mode de chauffage électrique se fait par un mode plus moderne et plus économique à savoir par induction dont suivent définition, principe et caractéristique.

2.2 Le chauffage par induction :

C'est Le chauffage par induction électromagnétique, il fait partie des techniques électrothermiques qui permettent de chauffer un matériau sans contact direct avec une source d'énergie électrique. Il consiste à plonger le corps à chauffer dans un champ électromagnétique variable dans le temps, et à dissiper sous forme de chaleur l'énergie entrant dans le corps. Il n'est applicable qu'aux matériaux conducteurs de l'électricité, c'est- La bande de fréquence employée est comprise entre la fréquence industrielle de 50 Hz et quelques mégahertz, si bien que les profondeurs de pénétration varie de quelques micromètres à quelques centimètres.

A. Le principe : Le principe du chauffage par induction électromagnétique est basé sur deux phénomènes physiques : l'induction électromagnétique et l'effet joule. Dans le paragraphe suivant, on donne le montage du fonctionnement du chauffage par induction

B. Montages :

- **Montage série a refaire :**

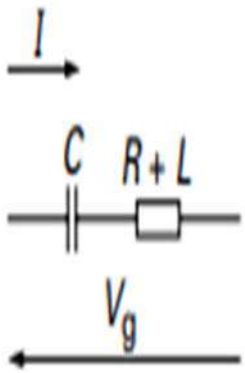


Figure 3.1 : représente le circuit série a refaire.

Le condensateur est placé en série avec l'inducteur (figure 3.1).Un tel circuit résonne à la fréquence pour laquelle l'impédance se réduit à R.

$$f^0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}} \qquad (3.2)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 - \left(Lw - \frac{1}{Cw}\right)^2} \qquad (3.3)$$

Le courant est maximal, en phase avec la tension du générateur Vg et égal à Vg/R.

La tension aux bornes de l'inducteur est égale à QVg ($Q = \frac{Lw_0}{R}$ étant la valeur du coefficient de qualité), et donc très supérieure à Vg.

- **Montage parallèle :**

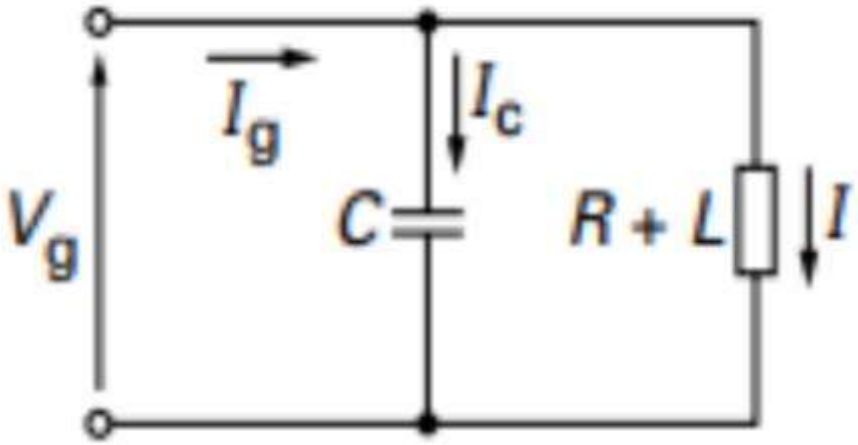


Figure 3.2 : représente le circuit parallèle.

La résonance a toujours lieu sensiblement pour la fréquence.

$$f^0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}} \qquad (3.4)$$

L'impédance complexe de l'ensemble inducteur-capacité (figure 3.2) est :

$$Z = \frac{R+jLw}{1-LCw^2+jRCw} \qquad (3.5)$$

Soit :

$$|Z| = \sqrt{\frac{R^2+(Lw)^2}{(1-LCw^2)^2+(RCw)^2}} \qquad (3.6)$$

À la résonance, Z : est maximal en module.

Un cas simple (fréquent en chauffage par induction) est celui où la résistance R de l'inducteur est faible devant sa réactance Lω.

Dans ces conditions, on peut dire que si la condition de résonance

(1 – LCω 2 = 0) est vérifiée,

On a :

$$Z = \frac{L}{RC} = Re \qquad (3.7)$$

L'impédance du circuit est alors réelle (R_e). Le courant fourni par le générateur(I_g) est minimal, en phase avec la tension et égal à V_g / R_e. Le courant dans l'inducteur I a pour valeur Q I_g. Il est très important par rapport au courant du générateur.

C. Comparaison de deux schémas :

On tire les conclusions suivantes de la comparaison des montages.

- **Générateur** : dans les deux cas, à la résonance, il débite sur une résistance pure.
- **Montage série** :

Le courant dans l'inducteur (I = V_g/R) est fourni intégralement par le générateur. Il traverse le condensateur et les liaisons électriques, ce qui entraîne une chute de tension et des pertes en ligne importantes.

Les tensions aux bornes de l'inducteur (QV$_g$) comme de la capacité sont fortes par rapport à celle du générateur V$_g$.

Un tel montage s'applique naturellement aux cas des faibles puissances et en haute fréquence, car l'impédance de l'inducteur est alors élevée (elle vaut environ Lω), ce qui nécessite une forte tension.

- **Le courant dans l'inducteur :** est fourni pour sa (faible) part active (Vg/Re) par le générateur et pour sa (forte) part réactive par le condensateur. Du fait que le courant du générateur est faible (I/Q), il y a moins de pertes en ligne.
  La tension aux bornes de l'inducteur est celle du générateur Vg.
  Un tel montage s'applique au cas des fortes puissances et aux fréquences basses ou moyennes pour lesquelles l'impédance de l'inducteur ne demande pas une forte tension.

D. Les avantages et les inconvénients :

✓ **Les avantages :**

Procédé technique:

- Grâce à la haute densité de puissance, une installation à induction peut être compacte et réaliser un chauffage rapide.
- L'induction permet d'obtenir des températures de chauffe très élevées.
- L'induction peut être appliquée de façon très locale.
- Les installations à induction sont compatibles avec les automatismes.

Consommation énergétique :

- Les installations à chauffage par induction ont en règle générale un bon rendement. Toutefois, le rendement dépend aussi de la nature du matériau à chauffer.
- Une part importante des pertes calorifiques peut être récupérée.

Qualité :

- Une pureté extrême peut être obtenue en travaillant sous vide ou dans des atmosphères inertes
- L'endroit de chauffe peut être déterminé avec précision
- Le chauffage peut être régulé précisément

Environnement et conditions de travail :

- Pas de production de fumée.

Limite :

- Une installation à induction requiert un investissement important qui ne peut être considéré qu'après comparaison avec d'autres techniques de chauffage.
- Le chauffage par induction est utilisé principalement pour le chauffage de formes simples.

✓ **Les inconvénients :**

- lors de mauvaises manipulations, d'autres objets peuvent être involontairement chauffés. Pour y remédier, on utilise le procédé d'émulsion ou le refroidissement par eau ;
- des coûts d'acquisition élevés pour les fortes puissances ;
- des champs électromagnétiques peuvent apparaître ce qui peut alors perturber l'environnement, lorsque les isolations sont mauvaises ou bien lorsqu'il y a une protection HF (haute fréquence).

E. L'effet Joule :

Lorsqu'un courant I [A] parcourt un conducteur électrique de résistance R, la puissance dissipée dans le conducteur est de type :

$$P = R\ I^2 \qquad (3.8)$$

Pour la plupart des applications de chauffage par induction, la résistance R ne peut pas être facilement déterminée du fait de la distribution non uniforme des courants de Foucault dans le conducteur.

2.3 Le Chauffage à gaz :

Dans le cas du chauffage au gaz, la source de chaleur est d'origine chimique due à la transformation de l'énergie chimique en énergie thermique suite à la combustion du gaz. Selon la réaction :

$$C_xH_y + (x + \frac{y}{4})O_2 \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O \qquad (3.9)$$

2.3.1 Composition du gaz naturel : en moyenne, il est composé de :

Méthane (CH_4) : 90 %

Éthane (C_2H_6) : 5 %

Propane (C_3H_8) : 1 %

Butane (C_4H_{10}) : 0,2 %

Azote (N_2) : 2,2 %

Dioxyde de carbone (CO_2) : 1,4 %

2.3.2 Les équations de la réaction de combustion des différents éléments :

- propane:

C_3H_8 (g) + $5O_2$ (g) → $3CO_2$ (g) + $4H_2O$ (g)

- butane

C_4H_{10} + 13/2 O_2 (g) = 4 CO_2 (g) + 5 H_2O (g)

- d'azote

$2N_2(g) + O_2(g) = 2NO_2(g)$

2.3.3 Les avantages et les inconvénients :

- ✓ **Les avantages :**

Le gaz est une énergie bon marché, surtout pour un payer comme le nôtre.

- ✓ **Les inconvénients :**

Le gaz reste une énergie polluante, il dégage beaucoup de dioxyde de carbone qui est un gaz à effet de serre.

3. Combustion a l'intérieur du four :

Le brûleur a une importance capitale dans le déroulement de la combustion. Il permet en effet de produire une flamme constamment stable pour tous les débits, ce qui aura pour conséquence un croûtage stable et par la même, une protection adéquate du réfractaire.

3.1 Influence de l'excès d'air sur la température de la flamme : Dans la plupart des cas, pour une meilleure combustion, on rajoute une quantité d'oxygène ; dans l'industrie du ciment cette quantité d'oxygène est injectée sous forme d'une quantité d'air et peut être caractérisé par un taux d'excès d'air. La présence de cet excès influe directement sur la température de la flamme, comme le montre la figure (3.3) ci-dessous :

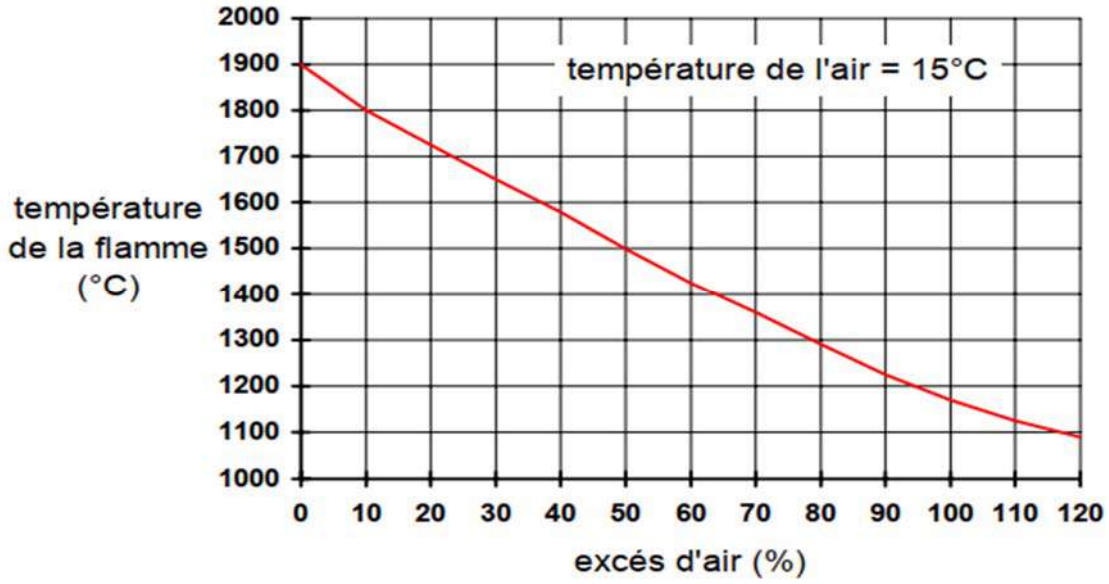


Figure 3.3 : la Température de la flamme en fonction de l'excès d'air [16]

Nous pouvons faire la constatation qu'à chaque fois que l'excès d'air augmente de10% la température chute de 100 °C.

4. Régulation thermique :

Dans un contexte de confort thermique, la régulation thermique est l'ensemble des techniques visant à contrôler la température et d'autres paramètres comme le contrôle de l'hygrométrie d'un système de chauffage, de climatisation, ou de ventilation. Le but: obtenir le confort dans la maison, l'appartement ou le bâtiment. On parle ainsi de régulation de température ambiante, de régulation en fonction de l'extérieur, ...

La régulation est souvent associée à des fonctions de programmation et de gestion, voire de domotique. Par exemple un module de régulation avec thermostat d'ambiance pourra également distinguer selon les heures et les jours, les modes confort, inoccupation et hors gel.

4.1 Fonctionnement du régulateur de température :

Un régulateur de température, est un appareil permettant de contrôler la température. Il est généralement couplé avec une sonde permettant de mesurer la température ambiante. Ainsi, il parvient avec précision à comparer la température ambiante et la température souhaitée pour la tâche en question. L'objectif principal du régulateur de température est de maintenir la température optimale du travail voulu du four. Le régulateur est relié à un élément de

commande du débit de gaz ou de la source de courant ou dispositif de ventilation.



Figure3.4 : Régulateur de température d'un four à gaz.

Pour les fours à gaz la régulation se fait par des robinets thermostatiques .

4.2 Qu'est-ce qu'un contrôleur de température?

Comme son nom l'indique, un régulateur de température est un instrument pour contrôler la température. Le régulateur de température prend une entrée provenant d'un capteur de température, et a une sortie qui est reliée à un élément de commande, tel qu'un dispositif de chauffage ou de ventilation.

Pour contrôler la température de procédé avec précision, sans intervention considérable de la part de l'opérateur, le système de régulation de température repose sur un régulateur qui accepte un capteur de température comme entrée tel qu'un thermocouple ou RTD.



Figure 3.5 : représente un régulateur de température.

Il compare la température réelle à la température de régulation désirée, ou la consigne, et fournit une sortie à un élément de commande. Le régulateur de température est une partie du système de contrôle complet, et l'ensemble du système doit être analysé lors de la sélection du régulateur de température correspondant.

4.3 Les différents types de régulateurs de température, leurs fonctionnent :

Il existe trois types de base de contrôleurs: marche-arrêt, proportionnels et PID. Selon le système à contrôler, l'opérateur sera en mesure d'utiliser un des types de régulateurs pour contrôler le processus.

- ✓ **Régulateur de température Marche-Arrêt** :

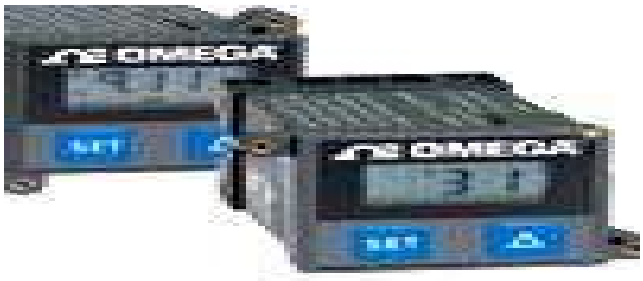


Figure3.6 : Un Régulateur de température Marche-Arrêt.

Un régulateur de température marche-arrêt est le dispositif de contrôle de température le plus simple. La sortie de l'appareil est allumée ou éteinte, sans état intermédiaire. Un régulateur de température marche-arrêt commute la sortie uniquement lorsque la température franchit la valeur de consigne.

Pour le contrôle de chauffage, la sortie est activée lorsque la température est inférieure à la consigne, et désactivée quand la température est supérieure à la consigne. Puisque la température franchit la valeur de consigne pour changer l'état de sortie, la température du processus est continuellement en cyclage, en partant d'en dessous de la consigne, jusqu'au-dessus, puis à nouveau en dessous. Dans les cas où ce cycle se produit rapidement, et pour éviter d'endommager les contacteurs et les vannes, un différentiel de marche-arrêt, ou «hystérésis», est ajouté aux opérations du contrôleur. Ce différentiel exige que la température dépasse la consigne par un certain montant avant que la sortie soit activée ou désactivée à nouveau. Le différentiel empêche les "claquements" de sortie, ou les commutations continuelles et rapides, si le cycle au-dessus et au-dessous du point de consigne est très rapide. La commande marche-arrêt est généralement utilisée quand un régulateur précis n'est pas nécessaire; dans les systèmes qui ne peuvent pas supporter une activation et désactivation fréquente; lorsque la masse du système est si grand que les changements de température sont très lents; ou pour les alarmes de température.

Un type particulier de commande marche-arrêt utilisé pour les alarmes est un régulateur de limite. Ce régulateur utilise un relais de verrouillage, qui doit être réinitialisé manuellement, et est utilisé pour arrêter le processus quand une certaine température est atteinte.

- ✓ **Régulateur proportionnel :**

Les commandes proportionnelles sont conçues pour éliminer le cycle associé à la commande marche-arrêt. Un dispositif de commande proportionnelle diminue la puissance moyenne fournie à l'élément chauffant lorsque la température s'approche de la consigne.
Cela a pour effet de ralentir le chauffage de telle sorte qu'il ne dépasse pas la consigne, mais il s'approche du point de consigne et maintient une température stable. Cette action de dosage peut être accomplie en activant et désactivant la sortie à de courts intervalles de temps. Ce "dosage" varie le rapport de la période "en marche" à la période "en arrêt" afin de réguler la température. L'action de dosage se produit au sein d'une "bande proportionnelle" autour de la température de consigne. En dehors de cette bande, le régulateur de température fonctionne en tant qu'unité de marche-arrêt, avec la sortie soit entièrement en marche (en dessous de la bande), soit totalement hors tension (au-dessus de la bande). Cependant, au sein de la bande, la sortie est activée et désactivée dans le rapport de la différence de mesure de la valeur de consigne. Au point de consigne (le point médian de la bande proportionnelle), le rapport de la commande marche/arrêt de la sortie est de 1:1; autrement dit, la période d'activation et la période de désactivation sont égales.

Si la température est plus éloignée de la valeur de consigne, les temps de marche/arrêt varient proportionnellement aux différences de température. Si la température est inférieure à la consigne, la sortie sera activée pour plus de temps; si la température est trop élevée, la sortie sera désactivée pour plus de temps.

- ✓ **Régulateur de température PID :**

Puisque le troisième type de contrôleur fournit un régulateur de température proportionnel intégral et dérivé, ou PID. Ce contrôleur combine le contrôle proportionnel avec deux ajustements supplémentaires, ce qui permet l'unité de compenser automatiquement les changements dans le système.



Figure 3.7 : régulateur de température PID.

Ces ajustements, intégraux et dérivés, sont exprimés en unités à base de temps; ils sont aussi appelés par leurs réciproques, REINITIALISATION et TAUX, respectivement. Les fonctions proportionnelles, intégrales et dérivées doivent être ajustées individuellement ou "accordées" à un système particulier par essai et erreur. Il fournit le contrôle le plus précis et stable des trois types de régulateurs, et est mieux utilisé dans les systèmes qui ont une masse relativement faible, ou ceux qui réagissent rapidement aux changements de l'énergie ajoutée au processus. Il est recommandé pour les systèmes où la charge change souvent et le régulateur est prévu pour compenser automatiquement en raison de changements fréquents de consigne, la quantité d'énergie disponible, ou la masse à contrôler.

4.4 Principe d'une régulation de température :

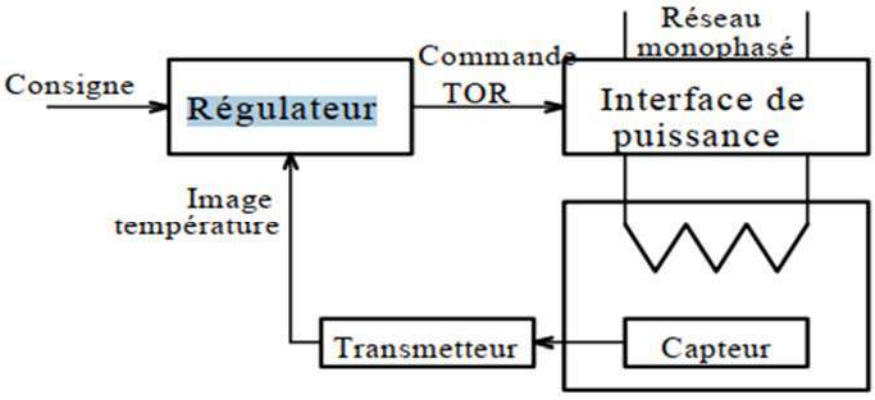


Figure 3.8 : représente le schéma de fonctionnent d'un régulation de température.

4.5 Régulateur de température avec afficheur numérique :



Figure 3.9 : représente un régulateur de température avec afficheur numérique.

4.5 La minuterie :



Figure 3.10 : photographie du four inox anti trace.

1 : la minuterie électronique d'un four.

Il s'agit d'une horloge dont la fonction est la commande de la durée de fonctionnement du chauffage, c'est un élément relié à la commande de l'alimentation de la source de chaleur, quelle soit à gaz ou électrique. Généralement, le four ne fonctionne pas avant la mise en marche de la minuterie et de même après écoulement du temps fixé par l'opérateur. Pour plus de sécurité la minuterie émet un signal sonore (des bips) pour avertir l'opérateur de

la fin du travail du four. Elle peut être numérique ou mécanique comme le montre les figures suivantes Figure 3.10 pour une horloge numérique et la figure 3.10 pour l'horloge mécanique.

CHAPITRE 4

LE BILAN D'ENERGIE ET L'ENERGIE FOURNIE DANS UN FOUR

1. LE BILAN D'ENERGIE :

1.1 Définition :

Le **bilan énergétique** d'une ressource énergétique désigne généralement le rapport entre la quantité d'énergie dépensée pour extraire cette ressource et l'énergie finale réellement disponible pour l'usager.

1.2 Le bilan énergie pour un chauffage à gaz :

$C_4H\ (g) + O_2\ (g) \rightarrow CO_2\ (g) + 2\ H_2O\ (g) + 11.05\ KWh/m^3$ (4.1)

$2N_2\ (g) + O_2\ (g) \rightarrow 2NO_2\ (g) + energies$ (4.2)

$C_3H_8\ (g) + 5O_2\ (g) \rightarrow 3CO_2\ (g) + 4H_2O\ (g) + 6.59\ KWh/m^3$ (4.3)

1.3 Le bilan énergie pour un chauffage électrique :

La consommation énergétique d'un logement peut être calculée à partir de la consommation réelle des appareils électriques qui y sont présents. Il vous suffit de multiplier le nombre d'heures d'utilisation sur l'année par la puissance des appareils en kWh.

Exemple : Calculer la consommation d'un aspirateur

On suppose l'utilisation d'un aspirateur 1x par semaine pendant 2 heures.

heures / jour	2 heures
jours / an	52 jours
Puissance aspirateur	2000 watts

Consommation électrique annuelle d'un aspirateur: 2 x 52 x (2000 watts / 1000) = **208 kWh**

Le calcul est le suivant: **[**nombre d'heures d'utilisation**]** **x [**nombre jours d'utilisation**] x ([**puissance appareil en watts**]** / 1000**)** = nombre kWh
La puissance doit être divisée par 1000 pour convertir le nombre de watts en kilowatts. Vous obtenez ainsi le nombre de kWh (kilowattheures).

1.4 Le bilan énergie pour un chauffage par induction :

La puissance maximale d'une plaque à induction oscille le plus souvent entre 2 000 et 3 000 Watts (W). Cette puissance vous indique la consommation de votre plaque électrique pendant 1 heure. En d'autres termes, si vous utilisez à pleine puissance une plaque à induction de 2500 W pendant 1 heure, vous consommez 2 500 W. Difficile de faire plus simple !

Puissance électrique moyenne d'une plaque à induction

Doux	Moyen	Chaud
200 W	1250 W	2500 W

Cependant, l'utilisation de la plaque se compte généralement en minutes pour la préparation d'un plat. Ainsi, pour calculer la consommation exacte selon l'utilisation, vous devez vous fier à la formule suivante :

CALCUL Puissance utilisée x Nombre de minutes d'utilisation / 60 = Consommation de la plaque (W)

Exemple : consommation et coût pour une préparation de pâtes :

Pour vous éclairer, voici les étapes à suivre pour calculer la consommation d'une plaque à induction et son coût pour une préparation de pâtes. Laissez-vous guider, il n'y a rien de sorcier !

Etape 1 : Calculer la puissance utilisée pour bouillir de l'eau

Si vous faites bouillir de l'eau (2min) sur un feu fort (2500 W), votre consommation reviendra à 83 W.

Etape 2 : Calculer la puissance utilisée pour cuire les pâtes

Si vous faites cuire vos pâtes (7min) sur un feu moyen (1250 W), votre consommation reviendra à 146 W.

Etape 3: Calculer le coût de consommation de la préparation de votre plat

La puissance totale de consommation de votre plaque à induction est de 229 W ou 0,229 kW. (83 + 146 = 229 W)

À partir de là, vous pouvez même calculer le prix de cuisson de vos aliments. Il suffit de multiplier la consommation électrique utilisée (exprimée en KW) par le prix du kWh.

2. L'ENERGIE FOURNIE :

2.1 Définition :

L'énergie est une grandeur physique nécessaire à la réalisation d'un travail (mécanique, chimique, ...) matérialisée sous différentes formes: énergie calorifique ou énergie thermique (chaleur), énergie électrique (électricité), énergie mécanique, énergie chimique, énergie nucléaire.

2.2 L'énergie fournie par gaz :

Tableau (4.1) : tableau représente l'énergie fournie par gaz.

Source d'énergie	Puissance calorifique
Gaz naturel	37,5 MJ/m3
Propane	25,3 MJ/L
Mazout	38,2 MJ/L
Électricité	3,6 MJ/kWh

2.3 L'énergie fournie par induction :

Le Chauffage par Induction se base sur l'apport d'Energie à travers le Champ Électromagnétique. Dans une Solénoïde, qui est une Bobine, de la taille appropriée, est défilé un courant électrique alternatif, donnant lieu à un champ magnétique. Pour la loi de Faraday, ce Champ Magnétique produit une force électromotrice induite qui provoque des courants induits, dits Parasites. Ces courants Parasites circulent dans un corps métallique qui est placé en proximité de la Solénoïde, ou encore mieux, si il est immergé dans celle-ci. Par effet Joule, dissipent l'énergie sous forme de chaleur, de sorte que le corps en métal s'échauffe sans aucun contact physique.
Le Solénoïde c'est un Inducteur et l'équipement qui lui fourni de l'énergie c'est une Chauffeuse à Induction à Moyenne Fréquence ou à Haute Fréquence. La Puissance et la Fréquence choisi sont en fonction de la géométrie de la pièce à chauffer, la Température à rattraper, le Temps de chauffe, le type de Métal, etc.

2.4 Energie fournie par l'électricité :

Dans le cas de l'énergie électrique, l'apport d'énergie est proportionnel à la quantité d'électricité. On peut illustrer cela avec la relation suivante :

$$E = Q \times \Delta V \qquad (4.4)$$

Où :

- L'énergie, notée E, en joules ;
- La charge, notée Q, en coulombs ;
- Et la différence de potentiel aux bornes de l'appareil, notée ΔV, en volts.

Et avec :

$$Q = I \times t \qquad (4.5)$$

- la quantité d'électricité peut se quantifier avec la formule suivante :

$$E = \Delta V \times I \times t = P \times t \qquad (4.6)$$

Où :

- P représente la puissance en watts ;
- Et t représente la durée en secondes.

L'énergie électrique notée E consommée par un appareil de puissance P pendant une durée t est donnée par les relations :

$$\begin{cases} E = P \times t \\ P = \frac{E}{t} \\ t = \frac{E}{P} \end{cases} \qquad (4.7)$$

Où :

- P : la puissance est exprimée en Watt ;
- E : l'énergie, est exprimée en joules si t, le temps, est exprimé en secondes ;
- Ou E : l'énergie, est exprimée en Wattheure si t, le temps, est exprimé en heure.

2.4.1 La loi de joule :

La loi de Joule correspond à une loi qui permet de définir le dégagement d'énergie, dissipée sous forme de chaleur, d'un résistor ou résistance qui se trouve parcouru par un courant électrique.

Ainsi, pour une résistance de résistivité R traversée par un courant d'intensité i, on obtient les relations suivantes :

$$P = R \times i^2 = P_J \qquad (4.8)$$

Et donc :

$$E = R \times i^2 \times t \qquad (4.9)$$

Où :

- E : représentant l'énergie, est exprimé en joules ;
- R : représentant la résistivité de la résistance, est exprimée en ohms ;
- I : représentant l'intensité du courant, est exprimée en ampères ;
- t : représentant le temps, est exprimé en secondes.

3. LE CHAUFFAGE DE L'ATMOSPHERE DU FOUR PAR CONDUCTION :

3.1 Flux de chaleur échange par conduction :

✓ **Loi de Fourier :**

Ce mécanisme de transfert est régi par une loi phénoménologique établie par Joseph Fourier en 1822, stipulant que la densité de flux échangée par conduction est proportionnelle au gradient de température (proportionnalité entre la cause (le gradient) et l'effet (le flux)). Cette loi, appelée **loi de Fourier**, s'écrit :

$\vec{\Phi} = -\lambda \vec{\nabla} T$ en W/m² (4.10)

Le signe (-) intervenant dans cette loi traduit le fait que le flux de chaleur circule des zones chaudes vers les zones froides (dans le sens opposé au gradient de température).

Le coefficient de proportionnalité(λ) est la **conductivité thermique**, en W/m/K.

La conductivité thermique dépend de la nature du corps considéré et dépend généralement de la température. Elle traduit la capacité d'un matériau à transporter la chaleur par conduction.

Ainsi, pour un gradient de température donné, le flux de chaleur sera d'autant plus important que la conductivité sera grande. Pour les matériaux conducteurs de la chaleur, λ sera élevée et inversement sera faible pour les isolants. Exemples à la température ambiante:

- λ vine de verre = 0.04 W/m/K
- λair = 0.026 W/m/K (l'air immobile est un très bon isolant)
- λ verre = 1.2 W/m/K
- λ cuivre = 390 W/m/K

Par ailleurs, pour un flux de chaleur donné, le gradient de température sera d'autant plus faible que ʎ est grand. Pour des flux modérés, on pourra ainsi dans certains cas considérer que la distribution de température à l'intérieur d'un corps de grande conductivité thermique est quasi uniforme.

3.2 Transfert de chaleur par conduction :

Considérons un système fermé solide (ou fluide au repos) homogène et indéformable, occupant un volume (ϑ) limité par une surface Σ. Ce système évolue au cours du temps sous l'effet d'échanges d'énergie sous forme de chaleur avec l'extérieur et/ou de production interne d'énergie calorifique. La distribution de température à l'intérieur du volume n'est pas uniforme et évolue au cours du temps. Le système n'est donc pas à l'équilibre thermodynamique et est donc le siège de flux de chaleur.

Pour établir l'équation qui régit l'évolution de la température en chaque point du volume (ϑ), nous allons faire un bilan d'énergie sur le système. Dans toute la suite du cours, on considèrera que le système est au repos et qu'il n'y a pas de travail mécanique mis en jeu car le système est indéformable (pas de variation de volume). La variation d'énergie interne du système entre les instants t et t + dt est alors

$$dU = \delta Qext + \delta Q\text{int} \qquad (4.11)$$

Où :

- dU : est la variation d'énergie interne du système pendant un intervalle de temps dt.
- δQext : est la quantité de chaleur échangée par le système avec l'extérieur à travers Σ pendant l'intervalle de temps dt.

- δQint : est la quantité de chaleur produite par dissipation dans le volume total ϑ pendant l'intervalle de temps dt.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\delta Qext}{dt} + \frac{\delta Qint}{dt} = \Phi_E + \Phi_R + \Phi_{PR} \qquad (4.12)$$

4. LE TRANSFERT D'ENERGIE ATMOSPHERE DU FOUR CREUSET :

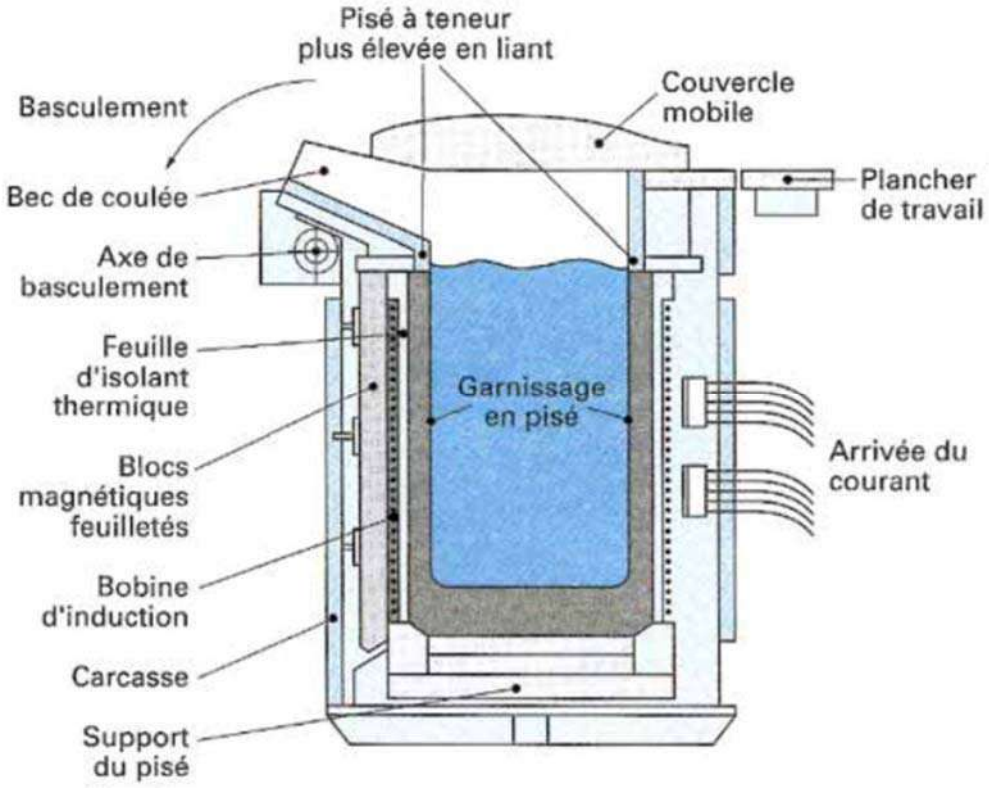


Figure 4.1 : schéma descriptif d'un four a induction.

Conduite et maintenance du creuset réfractaire

- Préchauffage : sur creuset froid et particulièrement lors du réchauffage après un arrêt prolongé, le préchauffage sera effectué au maximum à la vitesse de 300 ºC/h.
- Entretien et réparations : toute intervention devra être effectuée sur un creuset réfractaire préalablement nettoyé. Les fissures seront rebouchées avec une masse plastique fine.

5. CHAUFFAGE DES MATERIAUX ET FUSION :

Le point de fusion ou la température de fusion d'un corps représente la température à une pression donnée, à laquelle un élément pur ou un composé chimique fond c'est-à-dire passe de l'état solide à l'état liquide. Le point de congélation (ou point de solidification selon les matériaux) est la température de la transition inverse. Elle est habituellement mesuré sous pression atmosphérique normale (1 atmosphère) et il y a coexistence entre états solide et liquide entre ces deux points. Pour une substance pure, les points de fusion et de congélation sont théoriquement égaux et constants à pression fixe. Le point de fusion/congélation le plus connu est probablement celui de l'eau (0 °C), celui-ci ayant été pris comme zéro de l'échelle centigrade, souvent confondue avec l'échelle Celsius1.

La température de fusion est une propriété caractéristique de la matière, elle peut ainsi aider à identifier une substance. Elle n'est toutefois pas suffisante pour permettre une identification formelle, plusieurs molécules pouvant avoir une température de fusion très proche. Elle permet malgré tout d'écarter des molécules ayant une température de fusion éloignée.

5.1 Thermodynamique

Lorsqu'un corps solide pur est chauffé, la température augmente jusqu'à atteindre le point de fusion. Là, la température reste constante tant que le corps n'est pas passé entièrement sous phase liquide. La différence d'énergie pour causer la fusion complète n'est donc pas seulement celle qu'on doit ajouter pour atteindre la température critique mais également la chaleur latente (Lf) pour passer à l'état liquide. Du point de vue de la thermodynamique, l'enthalpie (H) et l'entropie (S) du matériau augmentent donc ($\Delta H, \Delta S > 0$) à T la température de fusion de telle façon qu'on peut les exprimer lors du changement d'un corps de masse m ainsi :

$$\Delta H = mLf \qquad (4.13)$$

$$\Delta S = mLf/T \qquad (4.14)$$

Ce qui donne $\Delta S = \Delta H/T$ (4.15)

Avec :

- ✓ Lf : Chaleur latente massique exprimée en J/kg ;
- ✓ ΔH : Variation d'enthalpie en J ;
- ✓ ΔS : Variation d'entropie en J/K ;
- ✓ m : masse en kg ;
- ✓ T : Température en K.

5.2 Caractéristiques :

Contrairement à la température de vaporisation (point d'ébullition), la température de fusion est assez insensible aux changements de pression, car les volumes molaires de la phase solide et de la phase liquide sont assez proches.

Généralement, lorsque l'on reste dans la même famille de composés chimiques, le point de fusion augmente avec la masse molaire. L'élément du tableau périodique ayant la plus haute température de fusion est le tungstène à 3 683 K (3 410 °C), ce qui en a fait un excellent choix pour les lampes à incandescence. Toutefois, le carbone (graphite) a une température de fusion de 3 825 °C. Le Ta4HfC5 est le matériau réfractaire qui a le point de fusion le plus élevé à 4 488 K (4 215 °C. À l'autre bout du spectre, l'hélium ne se congèle qu'à une température proche du zéro absolu et sous une pression de 20 atmosphères.

Le point de fusion est donc un moyen de vérifier la pureté d'une substance : toute impureté fera varier le point de fusion de la substance testée.

6. LE REFROIDISSEMENT DU FOUR :

Trois types de refroidisseurs sont actuellement proposés sur le marché. Ils sont rotatifs, à ballonnets, ou à grilles.

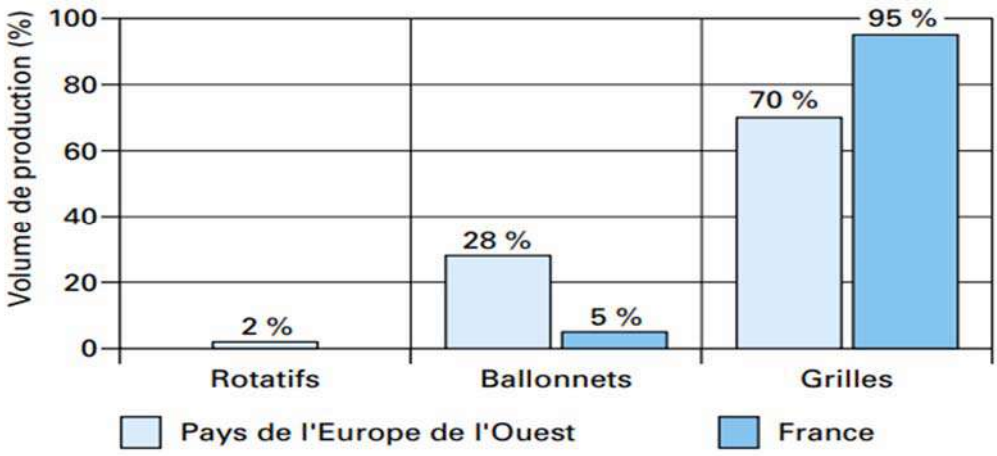


Figure 4.2 : schéma la répartition des technologies de refroidissement du clinker en fonction du volume de clinker produit.

La figure 4.2 : représente la répartition des technologies de refroidissement du clinker en fonction du volume de clinker produit.
La position dominante du refroidisseur à grilles n'existait pas dans les années 1970, époque où il était fortement concurrencé par le refroidisseur à ballonnets pour des raisons de fiabilité, de coût de maintenance, de simplicité de conduite, de coût d'investissement (absence de dépoussiérage). Simultanément, sont apparues :

- des contre-performances pour les refroidisseurs à ballonnets de four de grandes dimensions (4 000 t/j) ;
- des améliorations décisives dans la technologie des refroidisseurs à grilles ;
- la nécessité de produire de l'air tertiaire à 800-900 ºC pour le précalcinateur, que le refroidisseur à ballonnets est incapable de fournir.

6.1 Le retournement de tendance est tel que désormais :

- les refroidisseurs à ballonnets existants sont remplacés par des refroidisseurs à grilles dès que l'opportunité technico-économique se présente :
- les refroidisseurs à grilles conventionnels sont modifiés pour bénéficier de la fiabilité apportée par les plaques « caisson » ou assimilées ;

- les nouveaux refroidisseurs à grilles sont les seuls qui permettent l'augmentation des capacités de production par la précalcination en air tertiaire.

Le refroidissement s'effectuant selon le principe d'un échangeur à courants croisés, le refroidisseur à grilles est constitué de deux enceintes séparées horizontalement par un ou plusieurs plans de grilles.

Le corps du refroidisseur au-dessus des plans de grilles est entièrement protégé par un revêtement réfractaire. Des ventilateurs extérieurs alimentent les caissons situés en dessous de la grille ; l'air de refroidissement est alors réparti et insufflé à travers les plaques de grilles.

6.2 Le dimensionnement du refroidisseur :

Le dimensionnement est fonction de la capacité de production du four actuelle ou envisagée dans le futur. En une dizaine d'années, la charge spécifique (production du four rapportée à la surface du refroidisseur) est passée de 35 à 60 t/jm².

Cette évolution, liée à l'augmentation de la couche de clinker admissible (800 mm environ) sur le plan de grilles, a été facilitée par une conception nouvelle des plaques constituant le plan de grilles. De même, le soufflage massique, qui était, il y a 10 ans, de 2,80 Nm³/kg de clinker, est actuellement proposé à 1,80 Nm³/kg de clinker, voire 1,4 Nm³/de clinker. Le refroidisseur pendulaire équipé de nouvelles plaques permet d'atteindre ce ratio.

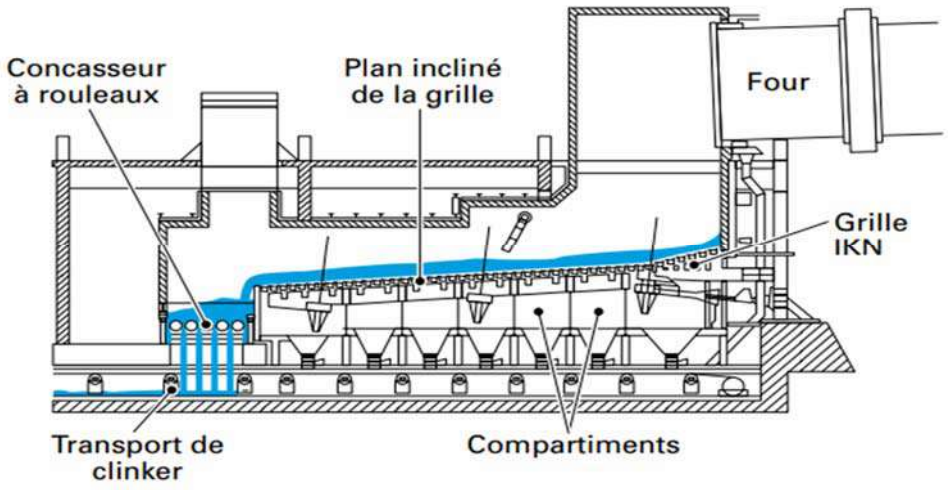


Figure 4.3 : refroidisseur a grilles incliné à suspension pendulaire.

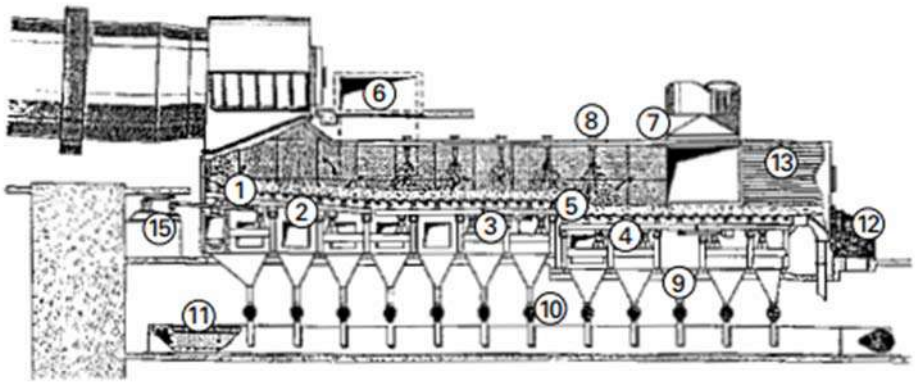
Afin de répondre à l'accroissement de capacité de production des fours, aux exigences en matière d'efficacité, de fiabilité et de réduction des coûts, les fabricants ont fait varier plusieurs des éléments constitutifs des refroidisseurs.

6.3 Le mode de supportage du plan de grille :

Conduit à distinguer deux familles de refroidisseurs : les pendulaires et les conventionnels.

6.3.1 Les refroidisseurs pendulaires : apparus en 1989, sont à plan de grilles incliné et commande unique avec concasseur à la sortie du refroidisseur (figure 4.3). Ils couvrent une gamme de production de 1 900 t/j à 9 100 t/j.

6.3.2 Les refroidisseurs conventionnels : peuvent être constitués de un à quatre plans de grilles. Ces plans sont horizontaux ou inclinés (15o à 5o) et peuvent être étagés. La situation du concasseur est soit intermédiaire, soit en sortie du refroidisseur. Les diverses combinaisons possibles de ces éléments permettent de couvrir une gamme de production jusqu'à 10 000 t/j.



① plan de grilles de trempe
② plan de grilles amont incliné
③ plan de grilles médian horizontal
④ plan de grilles aval horizontal
⑤ marche ou saut dont la hauteur communément admise est de 600 mm
⑥ prise d'air chaud dans le cadre d'une utilisation vers une précalcination par exemple
⑦ prise d'air excédentaire ou d'exhaure
⑧ injection d'eau possible mais rare
⑨ trémies de récupération des fines
⑩ sas d'étanchéité
⑪ chaîne traînante ou système de transport du clinker
⑫ concasseur
⑬ rideau de protection
⑮ groupe de commande plan grille amont

Figure 4.4 : représente un refroidisseur conventionnel à grilles : coupe longitudinale.

La coupe longitudinale d'un refroidisseur conventionnel à quatre plans de grilles (figure 4.4) permet de repérer les organes essentiels

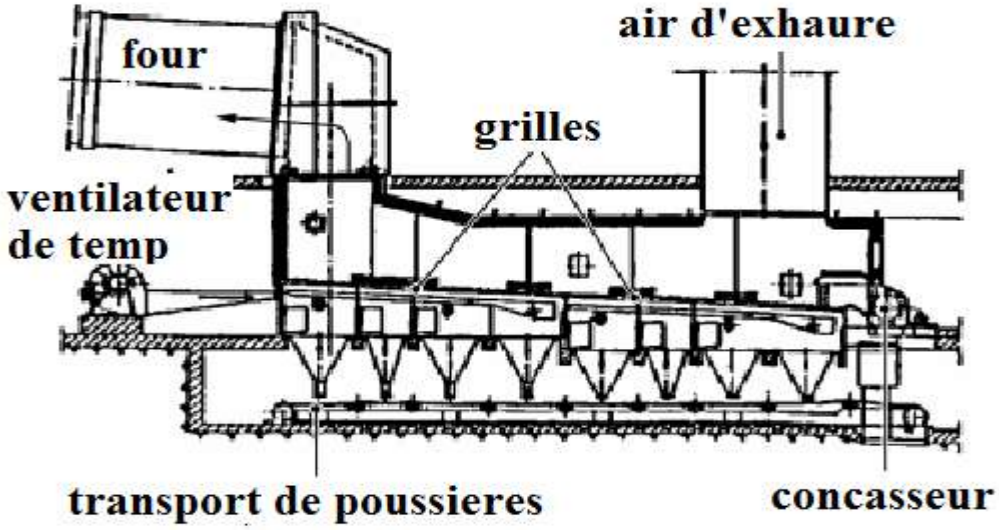


Figure 4.5 : représente un refroidisseur à deux plans de grilles inclinés pour une capacité de 4 000 t/j.

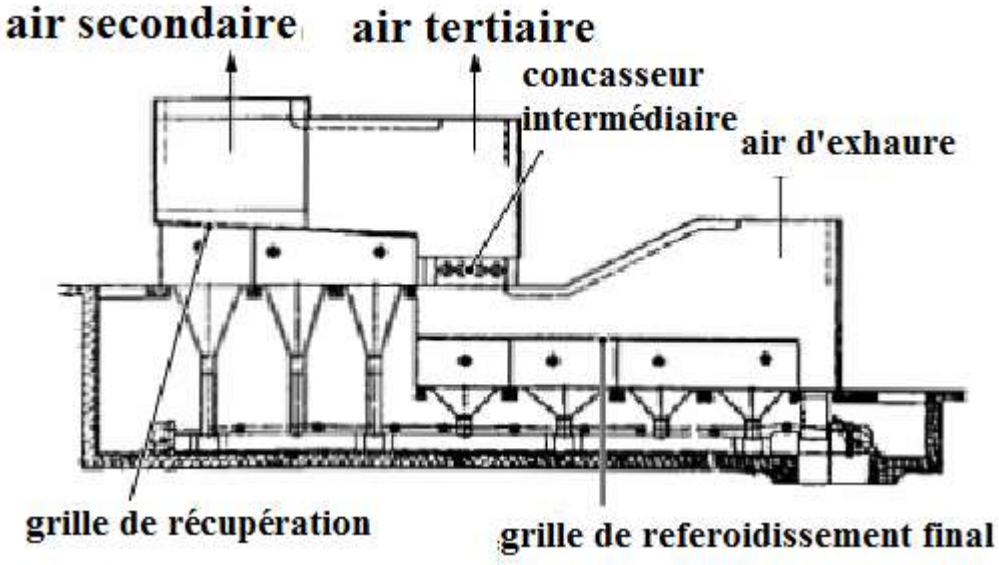


Figure 4.6 : représente un refroidisseur plan de grilles horizontal en aval pour une capacité de 5 000 t/j.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le four est un enceint maçonnée ou un appareil ,muni d'un système de chauffage puissent que transforme par la chaleur ,les produites et les objets ,il a différents fonctions cuisson des alimentes direct ou indirect ,il permet de cuire des aliment ,les fours permettent aussi la production et le traitement d'objets par la chaleur : poteuès céramique ,verres ,métaux ,le principe de fonctionnement du four est simple l'objet à trotter y est enfermé pour être soumis à un source de chaleur pouvant de l'intérieure ou de l'extérieure du four.la chaleur a l'intérieur du four peut être repartie du circulation forcée d'air par convection naturel ou par conduction thermique .

La source d'énergie pour fournir la chaleur du four peut être :

-un combustible « gaz naturel ».

-l'électricité par utilisation de l'effet joule dans une résistance ou par génération de micro-ondes.

BIBLIOGRAPHIE

[1]. J. Pierre et R. Pierre, Chimie Industrielle, **(1998)**.

[2]. P. Pierre, J. Leblond et Paul. H. E. Meijer, Physique de Transition de Phase, **(1999)**.

[3]. F. Jean-Marie Haussonne, Céramiques pour Composants Electroniques, (**1996)**.

[4]. C. Benhamideche, Thèse de Magister, Université de Constantine, **(1998)**.

[5]. P. Pascal, Nouveau Traite de Chimie Minérale, TomeVIII, **(1958)**.

[6]. A. Boutarfaia, C. Boudaren, A. Mousser et S. E. Bouaoud, Cerm, Inter, 21 **(1995)** 391.

[7]. B. Jaffe, R. S. Roth et S. Marzullo, J. Res, Natbur. Stand, 55 **(1955)** 239.

[8]. S. Zahi, Thèse de Magister, Université de Constantine, **(2002)**.

[9]. J. Dorlot, J. Bailon et J. Masounave, Des Matériaux, **(1986)**.

[10]. E. Moor, Les Leysmart, Introduction de la Chimie du Solide, **(1997)**.

[11]. R. Makhloufi, Thèse de Magister, Université de Biskra, (**2000)**.

[12]. Généralités sur les fours de raffinage « enspm, Formation Samir »

[13].les différents types d'isolation. www.tarvaux.com.

[14].Isolation_thermique_guide_isover.

[15].https://www.colli-net.com/media/pdf/fr/refraco/brochure_refraco_15fr