République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études

THEME :

ETUDE ET CONCEPTION D'UN FOUR POUR TRAITEMENT THERMIQUE

MASTER: Génie Mécanique
Spécialité : Ingénierie Des Matériaux et des Surfaces

Présenté(e)par : - DJIDLI Ramdane

-CHEKKAI Ahmed

Encadré(e) par : -Mr. BENIMAM Samir

Membres du jury : - Président:

- Rapporteur :

-Encadreur :

2020/2021

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah de nous avoir accordé l'aide et nous a donné la patience et le courage durant nos études.

Ce travail a été réalisé au département de technologie de l'université de Yahia Farés de Médéa.

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre promoteur Mr Benimam Samir pour l'aide compétente qu'il nous a apportée, pour sa patience, sa confiance, son encouragement, et Son œil critique qui nous a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections de notre mémoire, nous le remercions vivement.

Nous tenons aussi à remercier tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation particulièrement ceux du département de technologie « ingénierie des matériaux et des surfaces », de nous avoir donné la chance d'apprendre, et de nous faire partager leurs savoirs, sans eux nous ne serons jamais arrivé à ce stade.

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail de près ou de loin.

Merci ….

Dédicace

Quoi que de plus que de pouvoir partager les meilleurs moments de sa vie avec les êtres qu'on aime.

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mes parents.

A mes soeurs.

A mes frères.

À mon binôme et compatriote du projet de fin d'étude Chekkai Ahmed

A mes tantes, mes oncles ainsi que leurs familles.

A toute ma grande familleDjidli.

A mes meilleurs amies chacun à son nom.

Djidli Ramdane

Dédicace

Avec tout honneur et fierté, je dédie ce modeste travail :

A mes chères parent qui m'a vraiment aider par son

Encouragement Durant toute ma vie.

A mes chères soeurs.

A mes chers frères.

À mon binôme et compatriote du projet de fin d'étude Djidli Ramdane

A mes tantes, mes oncles ainsi que leurs familles.

A toute ma grande famille Chekkai.

A tous mes amies

A tout la promotion de Master II (2021).

Chekkai Ahmed

Résumé :

Les fours sont généralement construits par des matériaux réfractaires, ou brique réfractaire, qui peuvent atteindre une température élevée en fondant ainsi les différents types de matériaux ou simplement les chauffer à des hautes températures.

Aluminium est le seul métal qui est peut être facilement fondu, par contre les autres métaux (acier, fonte, les alliages d'aluminium, alliages cuivre) sont uniquement chauffés pour d'éventuelles traitements thermique qui sont des procèdes dans lesquels, grâces à des températures élevées, le métal subit des changements de propriété et de structure. Parmi ces traitements thermiques, les plus connus et utilisés on peut citer le recuit, le durcissement et la normalisation.

Abstrat :

Furnaces are generally constructed by refractory materials, or refractory brick, which can reach a high temperature thereby melting different types of materials or simply heating them to high temperatures.

Aluminum is the only metal that can be easily melted, on the other hand, other metals like (steel, cast iron, aluminum alloys, copper alloys) are only heated for possible heat treatments which are processes in which, thanks to high temperatures, the metal undergoes changes in property and structure. Among these heat treatments, the best known and used, mention may be made of annealing, hardening and standardization.

الملخص:

تصنع الأفران عمومًا بمواد مقاومة للحرارة، أو لبنة مقاومة للصهر، والتي يمكن أن تصل إلى درجة حرارة عالية وبالتالي تذوب أنواعًا مختلفة من المواد أو ببساطة تسخينها إلى درجات حرارة عالية.

الألومنيوم هو المعدن الوحيد الذي يمكن صهره بسهولة ، من ناحية أخرى ، يتم تسخين المعادن الأخرى (الفولاذ ، الحديد الزهر ، سبائك الألومنيوم ، سبائك النحاس) فقط للمعالجة الحرارية الممكنة والتي تتمثل في عمليات تسخين المعدن بفضل درجات الحرارة المرتفعة حيث يخضع لتغييرات في الخصائص والبنيات المجهرية. من بين هذه المعالجات الحرارية الأكثر شهرة واستخدام ، يمكن ذكر التلدين والتصلب والتوحيد القياسي.

Table de matière

Introduction 1

Partie I: synthèse Bibliographique

I.1. Définitions et généralités 2

I.1.1. Four 2

I.1.2. Combustion 2

I.1.3. Chaleur- Transfert de chaleur- Conservation de chaleur 2

I.2. Classification des fours 3

I.2.1. Classification des fours suivant la nature du combustible 3

I.2.2. Classification des fours électriques 4

I.3. Eléments constitutifs typiques d'un four 4

I.3.1. Foyer 4

I.3.2. Appareils d'alimentation 4

I.4. Transfert de chaleur 6

I.4.1 Fours à haute température 6

I.4.2 Fours à basse température 6

I.5. Calcul thermique des fours 8

I.5.1. Bilans énergétiques 8

I.5.2.Rendement énergétique d'un four 8

I.5.3. Rendement de combustion 8

I.5.4. Rendement des fours continus 9

I.6.Les types des fours 10

I.6.1. Four à pot moderne 10

I.6.2. Four à recuperation 10

I.6.3. Four à boucle 11

I.6.4. four à regénérateurs 11

I.6.4.1. Corps de fusion 12

I.6.4.2. Chambres régénératrices 12

I.7.Control de température 13

I.8.Contrôle de la préssion dans les fours 13

I.9.Domaines d'utilisations des fours a résistances 13
I.10. Réalisations industrielles 15
I.10.1 Traitement thermiques 15
I.10.1.1. Four de détensionnement de bâtis mécano-soudés 15
I.11.Fours de traitement d'acier moulé 18
I.12.Four a creuset 21
I.13.Fours a bain de sel 21
I.14.Le four à induction 23
I.15.Fours de maintien et fusion de métaux 26
I.15.1.maintien en fusion 26
I.15.2. Réajustement de température -fusion 26
I.16.Fours sous vide 27
I.16.1.Généralités 27
I.16.2.Choix des résistances 29
Chapitre II : Système de commande dans un four 30
II.1. La résistance 30
Chapitre III :Les réfractaires 36
III.1.Les réfractaires 36
III.1.1.Définition 36
III.1.2.Constituants 37
III.1.3.Procédés de fabrication 38
III.1.3.1. Préparation des matières premières 38
III.1.3.2.Malaxage 39
III.1.3.3.Façonnage 39
III.1.3.4.Séchage 39
III.1.3.5.Cuisson 40
III.1.4.Sollicitations des réfractaires 40
III.1.5.Corrosion des réfractaires 40
III.2.Mullite 41
III.2.1.Matière première : le kaolin 42
II.3. Réfractaire silico-argileux 42
III.3.1. Critère de choix des isolants 43
III.3.1.1. Influence de la porosité 43

III.3.1.2. Influence de la masse volumique apparente 44
III.3.1.3. Influence de la composition chimique 44
III.3.1.4. Influence de la température 44
III.3.1.5. Influence de l'humidité 45
III.3.2. Matières premières 45
III.3.2.1. La silice 45

Partie II: volet Expérimental

Chapitre IV : Choix et présentation du four 46
IV.1. Choix du four 46
IV.2. Présentation du four 46
IV.2.1. Caractéristiques 46
IV.2.2. Schéma représentatif du four 46
Chapitre V : Réalisation des couches réfractaires du four 49
V. 1. Dimensionnement des pièces 49
V.2.Processus de fabrication des matériaux réfractaires 52
V.3. Description des matières premières 53
V.3.1. Kaolin 53
V.3.2. Silice 54
V.3.3.Sciure de bois 55
V.3.4. Formulation et réalisation de la première couche réfractaire 55
V.3.5. Réalisation du caisson et montage 56
V.3.5.1.Réalisation du caisson 56
V.3.5.2.Montage 57
V.3.5.2.1.Montage du réfractaire 57
V.3.5.2.2.Montage de la partie électronique du four 58
V.3.5.2.3.Evaluation de performance 59
V.4.Essai de conception un four à ETRC 61
V.4.1.Mode opératoire 61
V.4.2.Préparation de notre échantillon 61
Conclusion Générale 63
Bibliographie 65

Liste des figures

Figure 1. Ventilateur de circulation de gaz dans un four de réchauffage de pièces en métaux non ferreux **7**

Figure 2. Four a pot moderne **10**

Figure 3. Four a récupération **10**

Figure 4. Four a bouche **11**

Figure 5.four a regénerateurs **11**

Figure 6.brique d'empilage de la chambre régénératrice **12**

Figure 7. schema du four - loche en position de repos (sans sol) **16**

Figure 8. Evolution des pertes avec la température du four **17**

Figure9. Vue en coupe des fours n°1 et n°2 **19**

Figure 10. Evolution des pertes avec la température **20**

Figure 11. Pertes totale d'un bain de sel d'couvert, en fonction de la température **23**

Figure 12. bobone inducatrice **24**

Figure 13.schema d'un four à induction **25**

Figure 14. Générateur HF **25**

Figure 15. Four à creuset pour maintien et fusion d'aluminium **27**

Figure16. tension de vapeur dans des métaux en fonction de la température **29**

Figure 17. Schéma simplifié d'un système de commande d'un four à résistor **30**

Figure 18 : Schéma de la microstructure d'un réfractaire **37**

Figure 19 : Diagramme de phase du système Al2O3-SiO2 **41**

Figure 20 : Structure d'un réfractaire silico-argileux **43**

Figure 21. Vue en perspective du four **47**

Figure 22. Vue de face **47**

Figure 23. Vue de droite (a) et vue de gauche (b) **47**

Figure 24. Vue intérieure et câblage **47**

Figure 25. Les réfractaires du four **48**

Figure 26. Coupe AA de la couche d'isolement **48**

Figure 27. Système d'isolement à n couches **49**

Figure 28. Système d'isolement à deux couches **50**

Figure 29. Processus céramique **52**

Figure 30. Kaolin **54**

Figure 31.silice **54**

Figure 32.sciure de bois **55**

Figure 33. Procédé pour réaliser les échantillons tests **56**
Figure 34. Photos du caisson du four **57**
Figure 35. Photos du montage des réfractaires **58**
Figure 36.le montage de partie électrique **58**
Figure 37. Graphique de performance du four à 10°C/mn **59**
Figure 38. Coupe de la portière d'un four **60**
Figure 39. Graphique de performance du four réparer à 10°C/mn **60**
Figure40. Le moule de notre échantillon **61**
Figure 41 : four de cuissant EPTRC **62**
Figure 42 : l'échantillon final **62**

Liste des tableaux

Tableau 1. Le rendement calculé. **10**
Tableau 2.pertes et les énergies stockée à 650°C. **17**
Tableau 3.les installations des fours **18**
Tableau 4. Pertes et énergie stocké à 1100°C. **20**
Tableau 5. Four industriels classique **29**
Tableau 6.fours destines à cuire de la faïence **31**
Tableau 7.grosseurs de fils **32**
Tableau 8. Caractéristiques techniques du four **46**

Introduction :

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.

On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui rend une approche globale assez délicate.

Le présent article traite les fours dans leurs généralités, on s'efforce d'y dégager des caractéristiques communes à l'ensemble des fours. Il introduit une série d'articles portant chacun sur les fours spécifiques à une industrie notamment

- les fours de l'industrie sidérurgique ;
- les fours de traitement thermique des métaux ;
- les fours de raffinage et de l'industrie chimique ;
- les fours de cimenterie ;
- les fours de l'industrie verrière ;
- les fours des industries céramiques et des produits réfractaires.

Dans ces textes, les aspects spécifiques à chaque type de fours seront abordés.

Notre travail est divisé en deux parties :

- La première partie est consacrée à une recherche bibliographique sur les fours, et le système de commande dans les fours.
- La deuxième partie expérimentale, sera consacrée à la conception et à la réalisation d'un four électrique de laboratoire atteignant une température de 1000°C.

Partie I : Synthèse Bibliographique

Chapitre I: synthèse bibliographique

I.1. Définitions et généralités :

I.1.1. Four : [1]

Unfourestunoutilutilisépouréleverlatempératured'unproduit.Ilpeutêtre 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).

Ils'intègregénéralementdansunelignedeproductioncomplexedontilestundesléments.

Ontrouvedesfoursdansuntrèsgrandnombred'activitésindustrielles,ce qui rend une approche globale assez délicate :

❖ Les fours de l'industrie sidérurgique;
❖ Les fours de traitement thermique des métaux;
❖ Les fours de raffinage et de l'industrie chimique;
❖ Les fours de cimenterie;
❖ Les fours de l'industrie verrière;
❖ Les fours des industries céramiques et des produits réfractaires.

I.1.2. Combustion :

La combustion est un phénomène de production de chaleur au cours de laquelle se réalise la réaction chimique de combinaison d'un corps combustible avec l'oxygène. La combustion est dite « oxydante » quand elle s'est réalisée en excès d'air ou plus précisément d'oxygène et inversement, nous avons une combustion « réductrice » quand elle est effectuée en défaut d'oxygène.

I.1.3. Chaleur- Transfert de chaleur- Conservation de chaleur :

La chaleur est une qualité de ce qui est physiquement chaud. C'est une énergie conduisant une température à un corps.

Elle se présente comme un flux thermique. Elle a la faculté de se propager dans un endroit où il y a une différence de températures. Elle s'écoule toujours des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides, pouvant d'ailleurs appartenir au même corps ou à des corps différents, donc suivant le sens positif du gradient de températures.

Le transfert de chaleur peut se manifester de trois façons : la conduction, la convection et le rayonnement.

- **la conduction** se réalise entre deux corps mis en contact. L'échange de chaleur est terminé dès que l'équilibre thermique est atteint. Ce type de transfert de chaleur est souvent rencontré dans les cas des corps solides.
- **La convection** c'est le cas de chauffage d'un objet dans un courant de fluide Elle s'effectue donc entre un corps solide et un fluide chaud qui circule à son contact. Le transfert de chaleur dépend de la température et de la vitesse de circulation du fluide, d'une part et de la nature du corps solide, d'autre part.
- **Le rayonnement** est le transfert de chaleur entre deux corps sans participation directe du milieu intermédiaire. L'un des deux corps qui est une source de chaleur est portée à une température déterminée puis envoie à son tour un rayon thermique vers l'autre corps. Depuis la découverte de Maxwell, nous pouvons dire que le rayonnement thermique est de nature électromagnétique.

I.2. Classification des fours :

Généralement, on peut classer les fours suivant la nature du combustible utilisé**.**

I.2.1. Classification des fours suivant la nature du combustible :

On peut citer :

- les fours à combustibles solides utilisant les bois de chauffe, les charbons, la houille, les cokes,… : four à bois de chauffe ou four à charbon
- les fours à combustible liquide utilisant les hydrocarbures tels que le gazole, fuel-oil, huile de vidange,... : four à fuel ou four à huile de vidange
- les fours à gaz : le combustible utilisé est un gaz provenant des coupes de pétrole.
- les fours solaires : la source d'énergie est le rayonnement solaire.

- les fours électriques: la chaleur utilisée est produite par usage de courant électrique.

I.2.2. Classification des fours électriques :

La classification la plus convenable de ces fours est basée sur les caractéristiques électriques, particulièrement sur la façon dont l'énergie électrique est transformée en calories.

Il y a deux façons d'effectuer cette transformation : dans l'arc ; dans des résistors.

Par suite on classe les fours électriques en :

- Fours à arc : la chaleur est générée par un arc électrique, c'est le passage d'un courant électrique entre deux électrodes à travers un gaz.
- Fours à résistances : la chaleur est produite par une résistance

I.3. Eléments constitutifs typiques d'un four :

Le four est essentiellement composé d'un foyer, des appareils d'alimentation, de système d'évacuation de fumées et des accessoires pour le chargement et le déchargement.

I.3.1. Foyer :

C'est la chambre de chauffe ou de combustion. Sa paroi intérieure doit être bien revêtue des éléments réfractaires jusqu'à une épaisseur convenable pour obtenir une résistance à température élevée (supérieure à 1500°C) et pour conserver la totalité d'énergie ou de chaleur produite pendant le chauffage.

Il doit être enveloppé d'une tôle d'acier bien renforcé.

I.3.2. Appareils d'alimentation :

Ces appareils sont les éléments moteurs de fonctionnement du four. Ils servent comme source de production et d'entretien de chaleur.En général,ils sont constitués de :

- **Résistance :**

C'est la source d'énergie pour chauffer le four.

- **Régulateur de température :**

La température de travail varie selon l'opération à réaliser. Or, afin de bien jouer sur la température, il nous faut un régulateur de température.

C'est un dispositif de mesure et de contrôle, permettant aussi de maintenir constante la température à une valeur voulue.

- **Cheminée :**

Les fumées qui sont des produits secondaires de la combustion, même si elles sont encore à haute température, doivent être évacuées pour éviter la surpression dans le foyer pouvant par conséquent entraîner une explosion; C'est le Dispositif destiné pour l'évacuation des fumées produit dans le foyer et aussi de régler les conditions du milieu dans le foyer.

I.3.3. Accessoires :

Ce sont le creuset et la pince.

- **Creuset :**

C'est un récipient en forme de vase destiné à contenir des charges à traiter. Il est constitué de matériaux réfractaires qui sont parfois électriquement et/ou thermiquement conducteurs et résistants chimiquement aux effets corrosifs de la matière traité tels que l'acier inox, le platine et le graphite.

Le choix d'un creuset dépend surtout de la température d'utilisation et de la nature du produit à traiter.

- **Pince :**

Le travail à exécuter est à réaliser à très haute température, pour assurer donc la sécurité afin d'éviter la brûlure, par exemple, on doit recourir à l'utilisation d'une pince à longue portée pour recueillir le creuset contenant la matière fondue ou cuite.

I.4. Transfert de chaleur : [2]

Dans les foursLa finalité d'un four est de transférer de l'énergie à une charge(produits) pour en élever la température. Ce transfert se fera pas lestrois modes de transfert de chaleur (rayonnement, convection, conduction), la plupart du temps simultanément, mais dans des proportionstrès variables.

I.4.1 Fours à haute température :

Ce sont les fours de sidérurgie, de verrerie, de cimenterie. La températureque l'on veut obtenir sur le produit dépasse, et parfois nettement,1 200 °C.

C'est également le cas d'un certain nombre de fours de l'industriedu pétrole et de la chimie dans lesquels, bien que la température duproduit soit inférieure à 500 °C, une partie importante de la chaleurest fournie directement par le rayonnement de la flamme dans unezone de radiation. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement parrayonnement de la flamme et des gaz issus de la combustion.

Les transferts de chaleur par rayonnement découlent fondamentalementde la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\emptyset = a\sigma S(T_f^4 - T_c^4)$$

Avec Ø puissance thermique

Et de considérations géométriques liées aux dimensions et aux positions respectives des surfaces réceptrices de la chaleur (le produit à chauffer),des surfaces et volumes des émetteurs(flammes et gaz de combustion)et des surfaces réflectrices(parois du four).

La convection jouera dans ces fours un rôle secondaire pour ce qui concerne la quantité de chaleur transférée, mais aura, dans uncertain nombre de cas, un impact non négligeable sur l'égalisation des températures.

I.4.2 Fours à basse température :

Ce sont, en particulier, les fours de traitement thermique de métallurgie, les fours de revêtement de surface et les fours pour les métaux non ferreux. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse rarement 700 °C, et est parfois sensiblement inférieure.

C'est également le cas des zones de convection des fours de l'industrie du pétrole et de la chimie.

Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par convection de gaz transparents. La loi fondamentale du transfert de chaleur est la loi de Newton :

$$Q = kS(T_f - T_c)$$

et on cherchera, pour un écart de température (T_f-T_c) donné, à augmenter le transfert de chaleur en améliorant le coefficient de convection k qui s'écrit d'une façon générale :

$$k = A\frac{\lambda}{l}Re^{1,8}Pr^{0,33}$$

Pr : (nombre de Prandlt) dépend essentiellement du fluide : ici les gaz de combustion. On voit qu'il faudra pour obtenir un coefficient d'échange k élevé, essayer d'augmenter la valeur de Re (nombre de Reynolds).

Cela se fera :

-soit par mise en vitesse du fluide : implantation de ventilateurs à l'intérieur de l'enceinte (figure 3), utilisation de brûleurs à grande vitesse d'éjection des gaz de combustion dans le foyer (figure 4), recyclage externe des gaz ;

-soit par augmentation des effets de pointe, comme l'adjonction d'ailettes ou de picots (studs) dans les zones de convection des fours tubulaires, qui accroissent simultanément la surface d'échange.

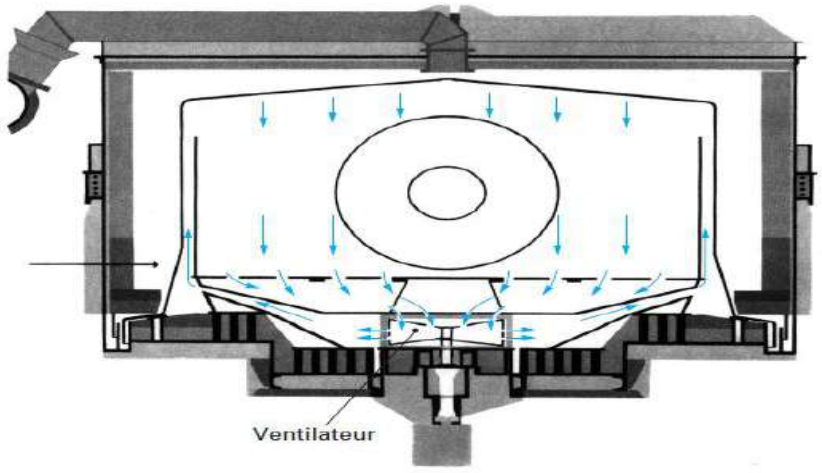


Figure 1. Ventilateur de circulation de gaz dans un four de réchauffage de pièces en métaux non ferreux

I.5. Calcul thermique des fours :

Chaque type de four a évidemment son processus de calcul propre, qui tient compte de sa technologie et de ses utilisations. On ne donnera donc ici que les principes de calcul communs à tous les fours et on se reportera utilement aux articles spécialisés.

I.5.1. Bilans énergétiques :

Quel que soit le four, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur déterminée par :

- sa température initiale ou température d'enfournement ;
- la température finale désirée ou température de défournement
- la masse des produits à chauffer ;
- la chaleur massique des produits et, s'il a lieu, les chaleurs de transformation durant la montée en température.

Soit Q_u cette quantité de chaleur utile.

I.5.2.Rendement énergétique d'un four :

Le rendement d'un four η est le rapport de l'énergie utile Qu à l'énergie Q qu'il faut fournir au four sous forme de combustible ou d'électricité.

En appelant Qp les diverses pertes thermiques, il vient :$Q = Qu + Qp$

Soit : $$\eta = \frac{Qu}{Q} = \frac{Q-Qp}{Q}$$

Le terme Qp comprend :

- les pertes par les fumées Q_f ;
- les pertes par les parois Qv ;
- l'énergie nécessaire au réchauffage des parois Qmv ;
- les pertes par les ouvertures du four Qe

I.5.3. Rendement de combustion :

Par définition c'est une grandeur lue et par convention le rendement de combustion η_c est exprimé en % sur P.C.I. Un combustible est caractérisé par :

- son pouvoir calorifique inférieur PCI
- le volume d'air nécessaire à sa combustion en stœchiométrie ;
- le volume de fumées produit par sa combustion en stœchiométrie.

Dans les conditions usuelles d'utilisation dans les fours, la combustion se fait généralement avec de l'air en excès.

On appelle rendement de combustion, le rapport :

Ou Q_a est la chaleur apportée par le volume d'air utilisé et Q_f est la perte par les fumées produites lors de la combustion complète.

Une combustion est la réaction chimique complète ou partielle du carbone et de l'hydrogène des combustibles usuels par oxydation de l'oxygène. Le rendement de combustion ne dépend que du combustible, de l'air dans lequel il est brûlé et de la température des fluides entrant et sortant du four. Il ne dépend pas du type de four, ni de sa technologie.

I.5.4. Rendement des fours continus :

En combinant les formules déjà citées, on peut obtenir une relation entre le rendement de combustion et le rendement du four :

$$\mathrm{n} = \boldsymbol{\eta\ c} - \frac{\mathbf{Qv + Qmv + Qa}}{\mathbf{PCI}}$$

Calcul du rendement :

Tirage		*tonnes/jour*	**600**	**500**
Combustible utilisé			GAZ NATUREL	
pouvoir calorifique inférieur ***PCI***		*Kcal/m³*	8421	8421
Quantité de gaz		*Nm³/h*	5400	4900
Energie totale fournie ***Q***		*KJ/h*	18 564 054	17 207 218
les diverses pertes thermiques Q_p	pertes par les fumées $\boldsymbol{Q_f}$	*KJ/h*	6 339 005	5 853 890
	pertes par les parois $\boldsymbol{Q_v}$	*KJ/h*	812 554	812 304
	pertes au réchauffage des parois $\boldsymbol{Q_{mv}}$	*KJ/h*	600 172	592 433
	pertes par les ouvertures du four $\boldsymbol{Q_e}$	*KJ/h*	993 981	880 481

	total des pertes	*KJ/h*	8 745 712	8 139 108
Le rendementd'électricité η		%	***52,89%***	***52,70%***
Le rendementde la combustion η_c		%	***88.75%***	***87.29%***
consommation spécifique C_s		*Kcal/Kg*	***1 819***	***1 981***

Tableau 1. Le rendement calculé.

I.6.Les types des fours :

I.6.1. Four à pot moderne :

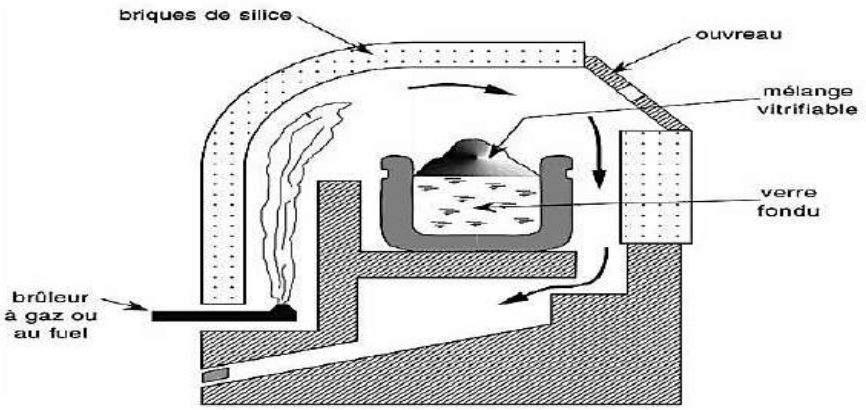


Figure 2. Four a pot moderne

I.6.2. Four à recuperation:

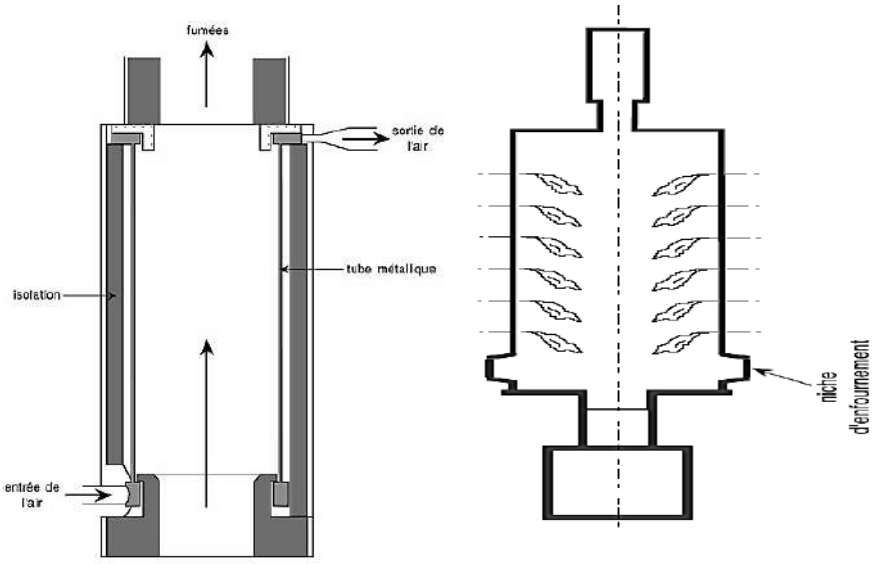


Figure 3. Four a récupération

I.6.3. Four à boucle:

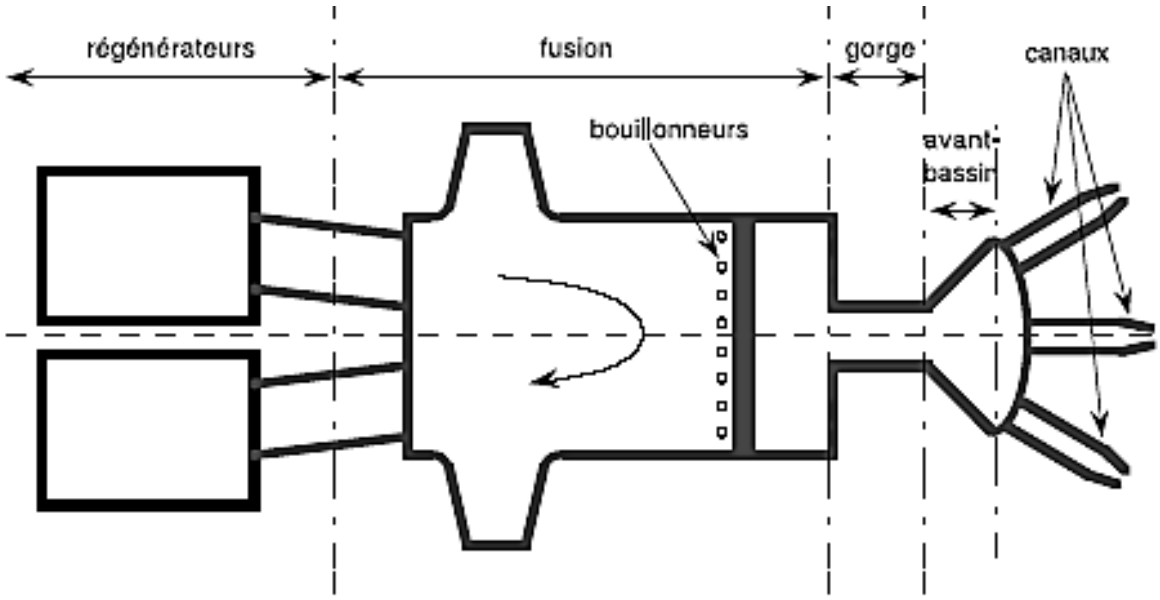


Figure 4. Four a bouche

I.6.4. four à regénérateurs:

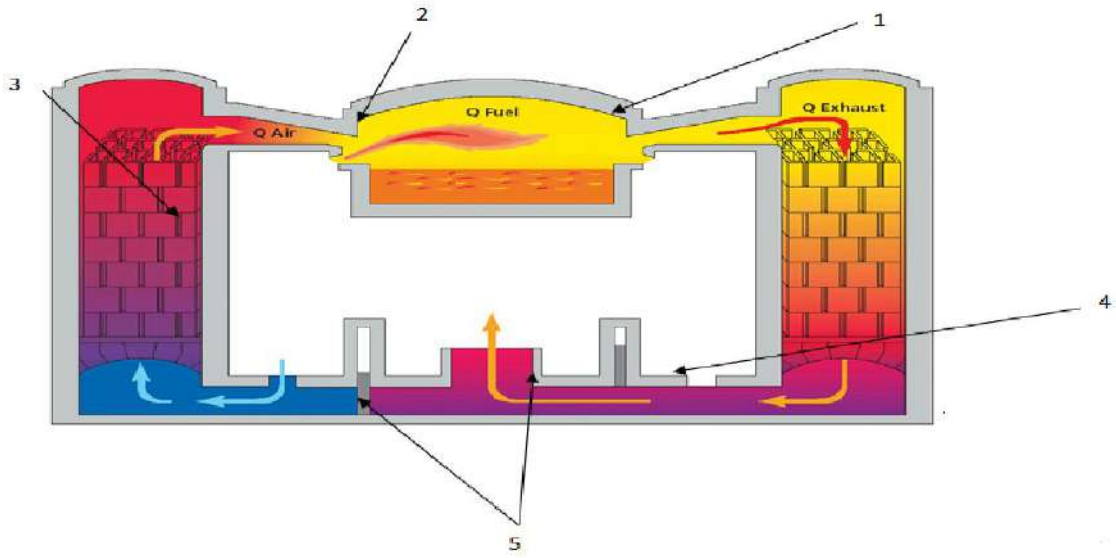


Figure 5.four à régénérateurs

1. Corps du four
2. Colliers de brûleurs
3. Chambres régénératrices
4. Système d'inversion
5. Carneaux principal et secondaires

I.6.4.1. Corps de fusion:

C'est un bassin où se trouve le volume du verre généralement appelée paroi de cuve. Elle est constituée en briques AZS (alumine, zirconium 41%, silice), sur-plantée par une voûte en briques de silice. Sur chaque côté il y a six chambres de régénération où ports, avec 03 injecteurs à flamme horizontale et à haute pression. Sauf le 6éme port, il en a deux.

Ces injecteurs permettent l'introduction du CH4 pour l'allumage des flammes qui peuvent atteindre une longueur de 8m, soit ¾ de la longueur du four.

I.6.4.2. Chambres régénératrices :

Les chambres de régénération sont reliées au four par les colliers de brûleurs, qui sont conçu d'une couche interne de brique en silice et d'une couche externe de brique en alumine.

Les colliers permettent la circulation de l'air (O_2) et l'évacuation des fumés vers l'extérieur.

Les chambres de régénération sont conçues en briques d'empilage à l'intérieur qui supportent des températures atteignant les 1500°C.

Elles fonctionnent suivant l'allumage de la flamme, elle permet alimentation de la flamme en O_2 de sont coté, du coté opposé elle permet d'évacuer la fumée et maintenir la brique chaude par la chaleur d'ou le terme de régénérateur.

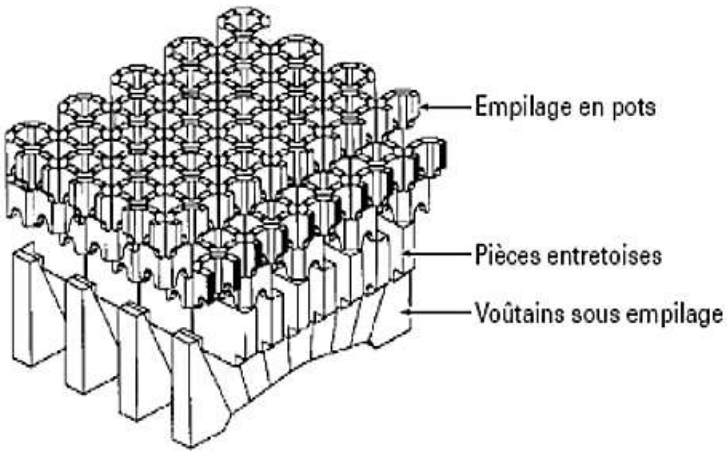


Figure 6.brique d'empilage de la chambre régénératrice

L'inversion est assurée par un système mécanique qui permet d'inverser la flamme de part et d'autre chaque 20min.

Les fumées sont évacuée dans un long couloir appelé carneau principal vers une cheminée d'une longueur de 82.5mètres.

I.7.Control de température:

Le contrôle de température se fait en permanence, plusieurs thermocouple sont misent en place a défirent endroit du four pour mesuré la température qui envoi les donné directement a la salle de command ou en les notes en permanence et

manuellement avec un pyromètres toutes les 30min dans chaque ports du four pour faire la vitrification des donné reçus.

I.8.Contrôle de la pression dans les fours:

La pression que l'on cherche à maintenir dans l'enceinte d'un four est de l'ordre de quelques dizaines de pascals (envièrent7 Ps). C'est un paramètre d'exploitation important qu'il faut suivre avec attention, il se fait a l'aide de défirent type des manomètres ou par action sur un registre placé dans le circuit d'évacuation des fumées .elle est ensuit enregistré automatiquement et contrôler en permanence dans la salle de commande.

En effect,un contrôle déficient de la pression peut entraîner des difficultés importantes:

-détérioration de la qualité du chauffage dans les fours.

-Augmentation de la consommation spécifique et diminution du rendement -détérioration de la combustion dans les fours

-dégradation des parois en cas d'excès de pression.

I.9.Domaines d'utilisations des fours a résistances :[3]

De nombreuses industries utilisent des fours a résistances, dans des applications très diverses, même pour une industrie donnée, et surtout dans des gammes de température très variées.

Sans prétendre être exhaustifs, citons les principaux domaines « consommateurs » de fours :

- Chauffage des métaux :
  - ✓ Fusion et maintien à l'état liquide
  - ✓ Frittage
  - ✓ Chauffage avent formage
  - ✓ Traitement thermiques
  - ✓ Brasage
  - ✓ Traitements de surface : émaillage, galvanisation, cuisson de peinture.
- Cuisson et émaillage de produits céramiques
- Cuisson de produits alimentaires.

Les fours ne sont pas fondamentalement différents d'un domaine à un autre. Ce qui les caractérise, ce n'est pas leur application mais essentiellement leur température d'emploi et la disposition de la charge ou le mode de manutention de cette dernière à travers le laboratoire.

C'est ainsi que la cuisson de produits alimentaires demande les températures les plus basses (comparable à celles utilisées pour le revenu de beaucoup de métaux), et utilise presque exclusivement des fours continus très automatisés, ayant une gamme de production très limitée.

Inversement, un four de cuisson de céramique doit souvent assurer une fabrication variée et demande les températures les plus élevées, parfois même à la limite d'utilisation de résistances.

Entre ces deux limites, l'émaillage requiert des températures moyennes mais est très souvent effectué dans un équipement très spécifique : le four est construit autour de la charge et de son moyen de manutention.

Le domaine du chauffage des métaux offrant le champ d'applications les plus variées (température, production, mode de manutention, etc.).

I.10. Réalisations industrielles :

I.10.1 Traitement thermiques :

Les fours à résistances étant particulièrement répandus dans les traitements thermiques des métaux il n'aurait pas difficile de présenter un très grand nombre d'exemples.

I.10.1.1. Four de détensionnement de bâtis mécano-soudés :

a) Problème à résoudre : un atelier de fabrication de machines-outils doit assurer le détensionnement, après soudure, de bâtis et châssis mécano-soudes

- L'épaisseur des tôles = 30 mm
- Charge maximale = 10 tonnes
- Température normale de traitement = 625 à 630°c possible à 750°c
- Le temps de montée = 4 heures
- Durée de maintien = 4 heurs

- Durée de refroidissement = 5 heuresinférieurà 250°c

b) Garnissage réfractaire :

Le garnissage de la cloche doit être le plus léger possible pour obtenir une très faible inertie thermique : à chaque traitement, il faut chauffer non seulement la charge mais également le garnissage ce qui entraine un supplément de consommation, supplément qu'il importe de réduire.

De plus, un faible poids de garnissage permet d'alléger la carcasse, ce qui augmente encore le gain sur poids total de la cloche.

Le garnissage se compose de deux nappes de fibreux respectivement de 128 kg/m³ et 64 kg/m³ puis de trois épaisseurs de laine de roche.

L'ensemble est maintenu par des goujons ou « studs » soudés sur la carcasse.

Les caractéristiques thermiques à 650°C (ambiance à 20°C) d'une telle paroi, de 21 kg/m²

Le choix est judicieux :

- Très bon rapport qualité-prix
- Première couche de très bonne qualité, compte tenu de la température modérée du four ;

- Assez faible inertie thermique ;
- Très faible valeur des pertes.

Composition et échauffement des murs :

- **Paroi de 192 mm, de composition suivant :**

  37 mm de Kerlane 45-128 (ʎ moyenne = 0,115)

  25 mm de Kerlane 45-64 (ʎ moyenne = 0,128)

  30 mm de BX 353 (ʎ moyenne = 0,128)

  50 mm de BX 343 (ʎ moyenne = 0,110)

  50 mm de BX 333 (ʎ moyenne = 0,061)

- **Pertes et échauffements :**

  Pertes = 0,298 Kw/m²

  Température après la couche n°1 =554°C

  Température après la couche n°2 =496°C

  Température après la couche n°3 =426°C

  Température après la couche n°4 = 291°C

  Température sur tôle externe = 50°c

- **Temps de mise en équilibre** =3,22 heur
- **Energie stockée =** 2,31 Kwh/m²
- **Majoration des pertes pour tirants =** 4,8% pour 250mm²/m² (acier inoxe)

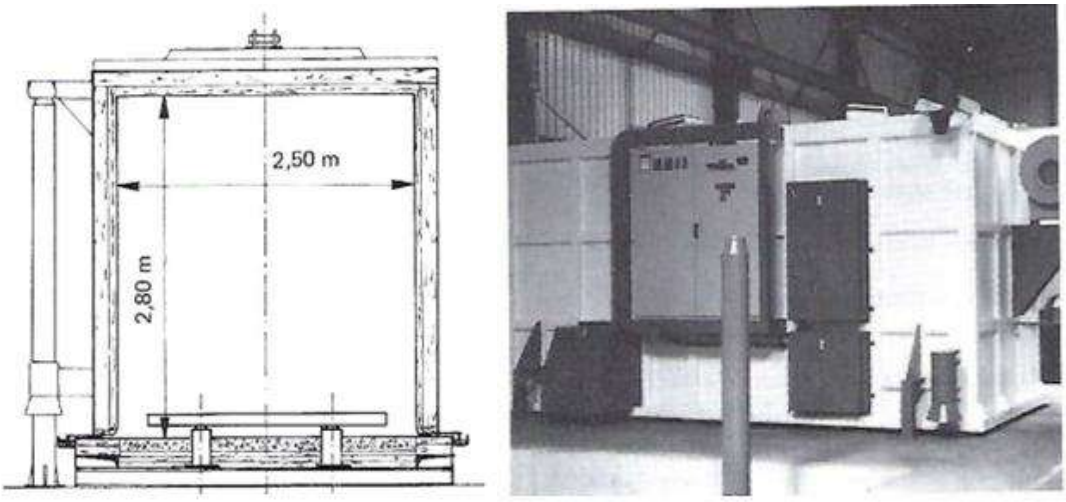


Figure 7.schema du four - cloche en position de repos(sans sol)

Pertes par les parois du four	**Valeurs en Kw**	**Energie stockée dans le four**	**Valeurs en Kwh**
Par les parois latérales Par les murs de fond Par la voute Par la sole Par le joint	9,7 4,7 5,0 6,5 2,2	Par les parois latérales Par les murs de fond Par la voute Par la sole Par les supportes de charge	71,8 34,8 37,0 232,6 17,6
Pertes totales du four	28,2	Energie totale	394

Tableau 2.pertes et les énergies stockée a 650°C.

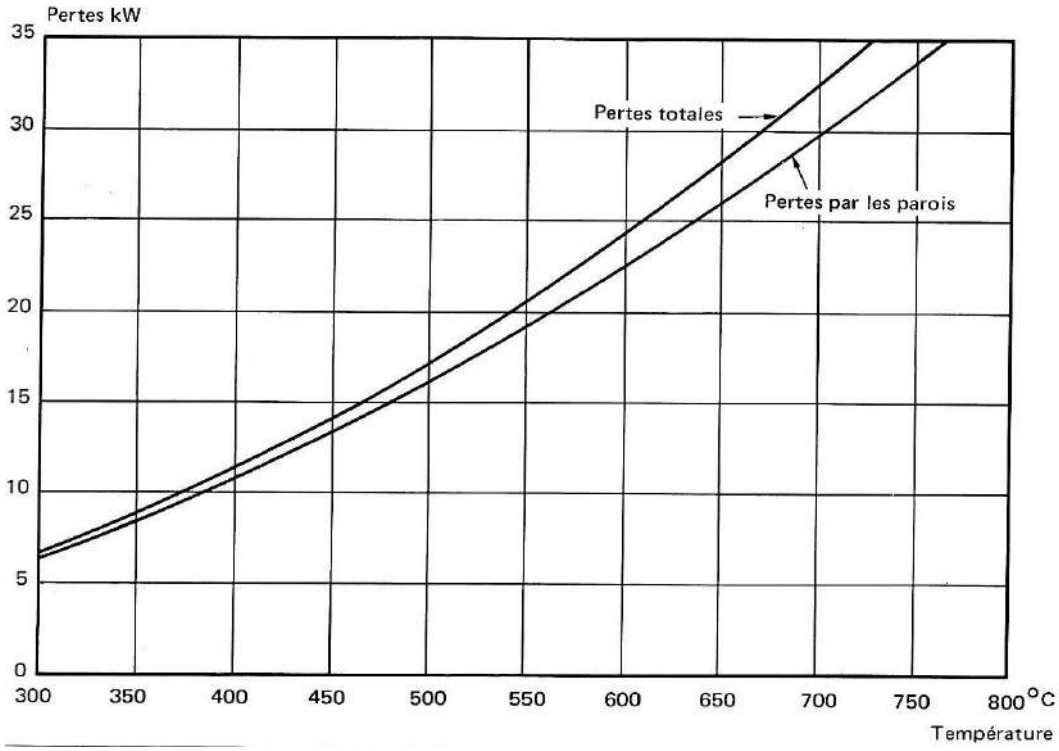


Figure 8. Evolution des pertes avec la température du four

Les courbes de la figure8 donnent l'évolution des pertes avec la température du four. Il faut noter que cette évolution n'est pas linéaire.

I.11.Fours de traitement d'acier moulé :

a) Problème à résoudre : une fonderie d'acier, spécialisée dans la production de pièces d'usure et de pièces de grandes démentions (cœurs monobloc insérés dans les appareils de voies de chemins de fer) est complétée par un atelier de traitements thermiques totalement reconstruit.

Le tonnage traité annuellement est d'environ 12000 tonnes dans la masse unitaire peut aller de 10 kg à 60 tonnes.

Comme une part importante de la production est en acier au manganèse, pour 70% du tonnage, les températures atteignent 1000 à 1100°c. Pour 20%, celles-ci sont de 900à 950°c, le reste de la production étant constitué de revenus 200 et 650°c.

Pratiquement, tous les traitements sont soumis à deux impératifs ;

- Chargement en four froid ;
- Cycle de température programmé ;

La durée des cycles les plus courants s'échelonne de 12 à 20 heures.

b) Choix du type de four : La diversité des charges et la multiplicité des cycles conduisent à une solution comportant plusieurs fours dont les démentions doivent tenir compte de celles des bacs de trempe existants.

L'installation comprend 4 fours :

Four n°	Démentions utiles du four	Poids brut de la charge	Température maximale
1	4,1 x 5 x 2 m	22 t	1100°c
2	4,1 x 5 x 1,2 m	17 t	1050°c
3	2 x 12 x 1,55m	20 t	1050°c
4	4 x 4,5 x 3,5 m	80 t	1100°c

Tableau 3.les installations des fours.

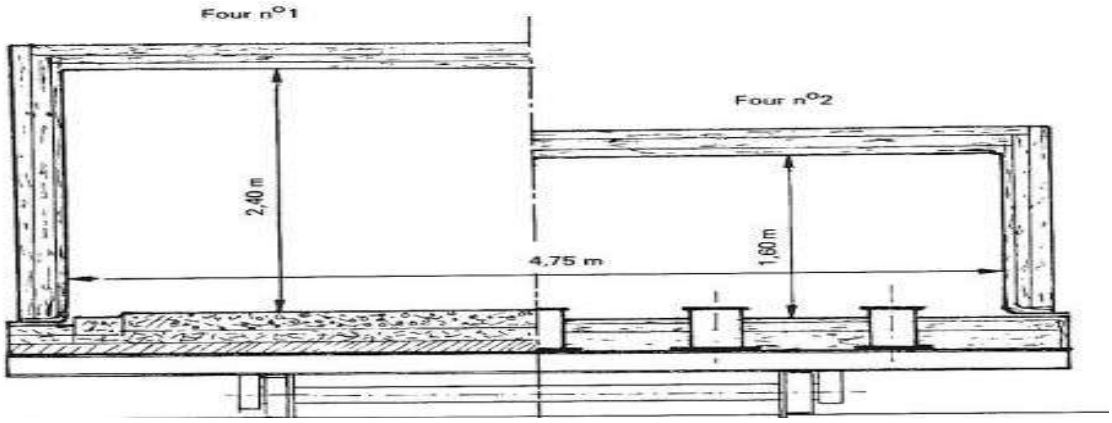


Figure9. Vue en coupe des fours n°1 et n°2

c) Garnissage réfractaire :

Le garnissage de la cloche doit être le plus léger possible pour obtenir une très faible inertie thermique : il faut en effet, à chaque traitement, chauffer la charge et le garnissage, ce qui entraine un supplément de consommation, supplément qu'il est intéressant de réduire.

Par ailleurs, un faible poids de garnissage permet d'alléger la carcasse, ce qui augmente encore le gain sur poids total de la cloche à lever.

Le garnissage est identique pour les deux fours et se compose de 4 nappes de fibreux de densité décroissant lorsque l'on s'éloigne de la face chaude : 160, 128, 96, et 64kg/m³.

L'ensemble est maintenu par des goujons ou « studs » isolés thermiquement de la carcasse. Des goujons spéciaux servent également à supporter les résistances.

Les caractéristiques thermiques à 1100°c (ambiance à 20°c) d'une telle paroi de 23 kg/m³, sont les suivantes :

d) Composition et échauffement des murs :

- Paroi de 250mm, de composition suivante :

  25 mm de Kerlane 60-160 (ʎ moyen = 0,295)

  25 mm de Kerlane 45-128 (ʎ moyen = 0,282)

  100 mm de Kerlane 45-96 (ʎ moyen = 0,227)

  100 mm de Kerlane 45-64 (ʎ moyen = 0,102)

- Pertes et échauffements :

  Pertes= 0,646 kw/m²

  Température après la couche n°1 = 1046 °c

Température après la couche n°2 = 989 °c

Température après la couche n°3 = 705 °c

Température sur tôle externe = 77 °c

- Tempe de mise équilibre : 3,30 heurs
- Energie stockée : 5,14 kwh/m²
- Majoration des pertes pour tirants ou studs : 2,9 % pour 250 mm²/ m² (acier inox)

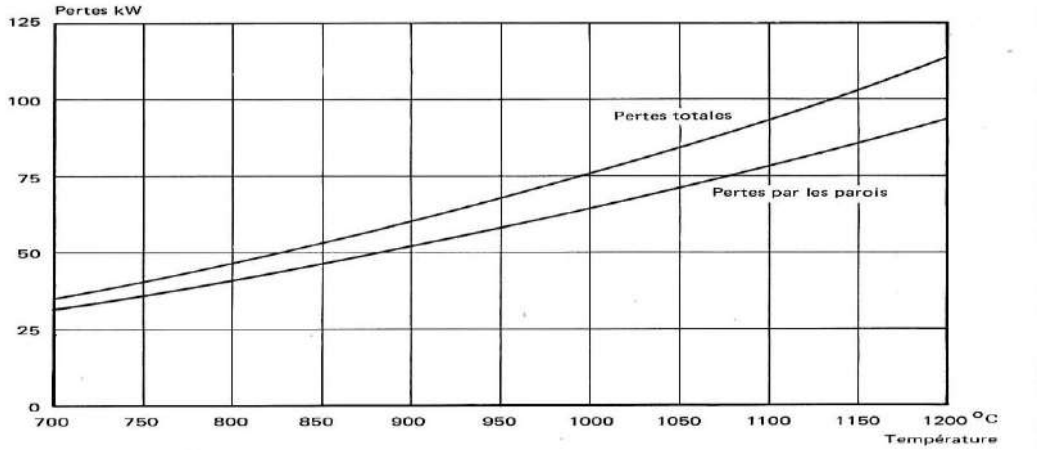


Figure 10. Evolution des pertes avec la température

Les courbes de la figure 10, donnent l'évolution des pertes avec la température du four, évolution qui est loin d'être linéaire : les pertes varient approximativement comme le carré de la température du four.

Pertes par les parois du four	**Valeurs en Kw**	**Energie stockée dans le four**	**Valeurs en Kwh**
Par les parois latérales	18,2	Par les parois latérales	140,6
Par les murs de fond	16,0	Par les murs de fond	123,4
Par la voute	19,9	Par la voute	153,3
Par la sole	24,1	Par la sole	3974,3
Par le joint	15,0	Par les supportes de charge	768,6
Pertes totales du four	93,1	Energie totale	5161

Tableau 4. Pertes et énergie stocké à 1100°C.

I.12.Four a creuset :

Bien que l'ensemble creuset-contenu puisse être considéré comme une charge à chauffer, il est bon d'examiner rapidement les particularités de ce type spécial de fours à résistances.

Ils se distinguent des fours classiques par certains aspects technologiques et énergétiques qui peuvent entrainer des conditions particulières d'exploitations.

Pur faciliter l'exposer, il est préférable de classer ces fours en deux catégories :

- ❖ Les fours à bain de sel ;
- ❖ Les fours pour maintien et fusion de métaux.

I.13.Fours a bain de sel :

Aspects énergétiques :

Dans de tels fours, le milieu chauffant, en contact avec les pièces à chauffer, n'est plus de l'air ou une atmosphère gazeuse, mais un sel fondu(éventuellement un métal liquide) relativement dense.

Cela présente deux particularités :

- l'échange d'énergie entre sel et pièces est beaucoup plus rapide que dans un four Conventionnel.
- inertie thermique du milieu chauffant, devant celle des pièces, est également plus importante que dans un four conventionnel.

La nature des échanges d'énergie par conduction entre deux matériaux, avec la présence d'une interface complexe, fait que la modélisation du chauffage est assez compliquée.

La vitesse possible du chauffage est telle, qu'en général, elle est limitée par la puissance de chauffe du four qu'il est raisonnable de ne pas dépasser.

Un autre phénomène conduit à installer la puissance maximale : les pertes par la surface du bain sont très importantes et la plupart du temps, ces fours sont exploités avec un bain découvert et un dispositif d'aspiration des fumées créant une certaine convection.

La **figure 11** donne les valeurs approximatives des pertes totales par un bain de sel découvert soumis à une aspiration normale, en fonction de la température.

Un autre avantage, du à la forte inertie thermique du bain de sel, est la très bonne homogénéité de température; ceci est lié à la bonne conductivité thermique habituelle des sels en fusion.

Le volant thermique qu'est le bain de sel, entraine toutefois trois inconvénients :

- le changement de température d'exploitation n'est pas aisé.

Le plus souvent, cet inconvénient disparait car les bains de sel sont assez spécialisés dans leur emploi et sont exploités à température de consigne pratiquement constante.

- la remise en condition après un arrêt peut être assez longue.

Ceci explique pourquoi, pendant les périodes de veilleuse, la température de consigne est conservée, ce qui n'est pas sans influence défavorable sur le bilan énergétique de l'exploitation.

- la régulation de température est relativement délicate.

La valeur élevée de la constante de temps conduit à des réglages de régulation continue très différents de ce qu'ils sont dans les fours conventionnels. Ceci est d'ailleurs renforcé par l'importance des pertes par rapport à la puissance installée (les pertes peuvent atteindre 30 à 40% de la puissance installée).

Par volant thermique, on entend uniquement l'inertie du bain liquide. Bien entendu, il est exclu de considérer la chaleur de fusion (qui, fréquemment, est très comparable à l'énergie nécessaire pour élever la température du sel liquide de 100°C) : la solidification du bain est, en général, à éviter.

L'ensemble de ces conditions, rend donc l'utilisation d'une régulation en cascade assez souhaitable.

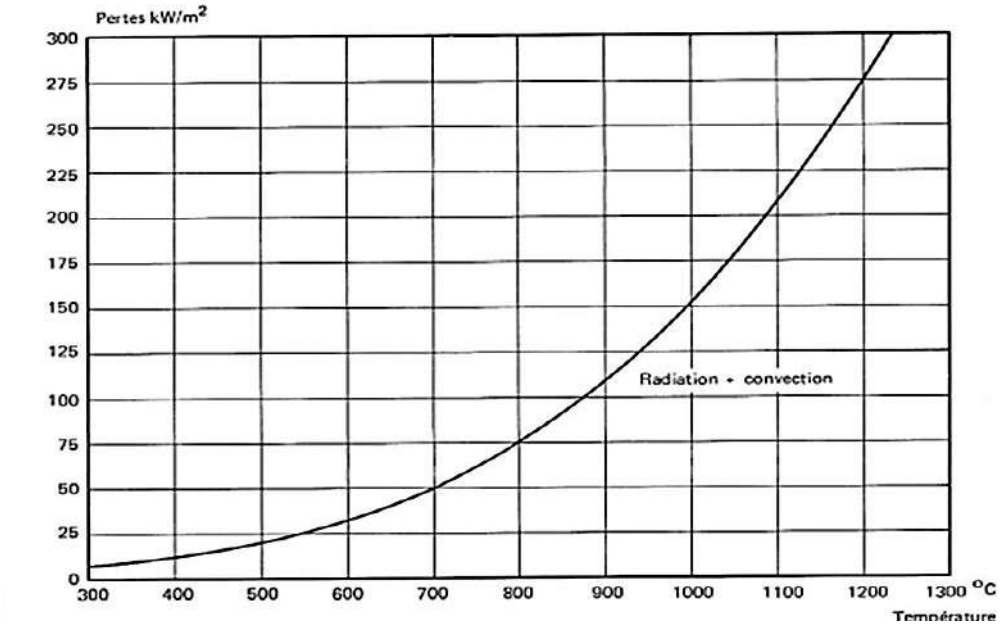


Figure 11. Pertes totale d'un bain de sel d'couvert, en fonction de la température

I.14.Le four à induction :

Ce type de four utilise le principe de l'induction électro magnétique, selon ce principe physique, un champ magnétique produit dans le métal un courant électrique induit, le métal se comporte alors telle une résistance et chauffe proportionnellement à la puissance du champ.

Les fours à induction utilisent des bobines dans lesquelles passe un courant électrique pour générer un champ magnétique intense, il est oriente et concentre sur les charges métalliques, présentes dans le creuset réfractaire.

La bobine inductrice placée autour du creuset est refroidie à l'eau afin d'éviter toute surchauffe et dégradation de cette dernière, des écrans magnétiques sont disposés tout autour pour refermer le champ sur la zone de fusion.



Figure 12. bobone inducatrice

I.14.1.Méthode de réalisation :

Pour la réalisation il y a deux parties :

- Partie structurale
- Partie électrique

I.14.2.Plan de réalisation:

On divisera notre travail selon la disponibilité du matériel, spécifiquement du générateur à haute fréquence:

A- Si le générateur à HF est disponible:

- D'abord on commence par fabriquer la structure métallique chez un artisan, ses dimensions dépendront du creuset.

-Puis on installe le récipient dans la structure

-Après on l'entoure par une bobine inductrice

-On relie la bobine au générateur à HF

-En fin on installe un système de refroidissement

B- Si le générateur à HF n'est pas disponible:

-On commence aussi par fabriquer la structure métallique à l'aide d'un artisan, ses dimensions dépendront du creuset

-Puis on installe le récipient dans la structure

-Après on l'entoure par une bobine inductrice

-On réalise le circuit électronique

-On relie la bobine au circuit

-En fin on installe un système de refroidissement qui est un ventilateur

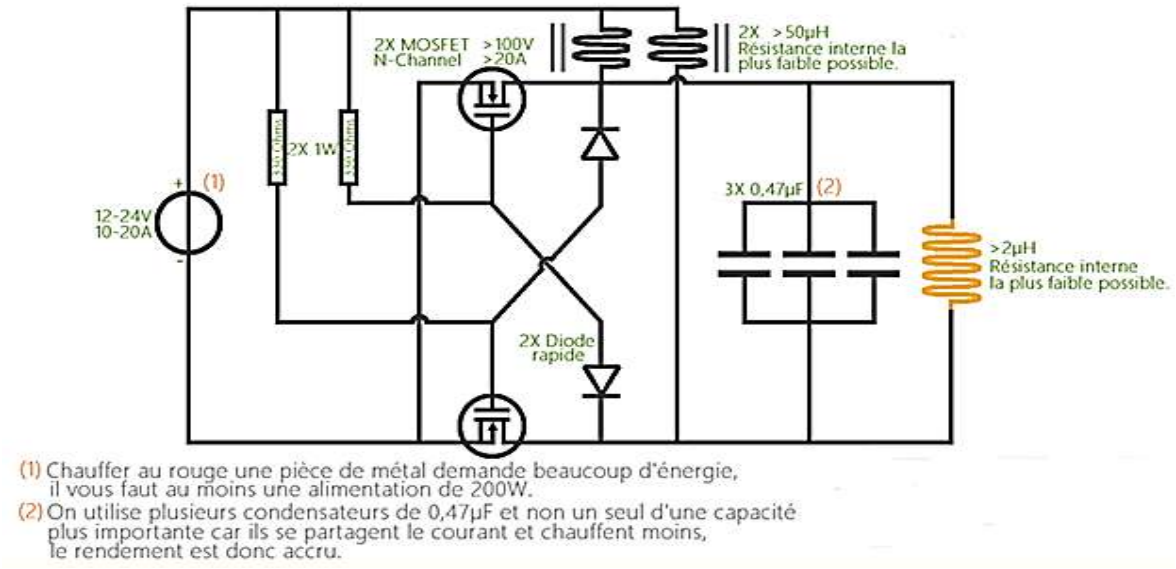


Figure 13.schema d'un four à induction



Figure 14. Générateur HF

I.15.Fours de maintien et fusion de métaux: [3]

I.15.1.maintien en fusion :

L'utilisation la plus courante est le four de maintien en fusion d'aluminium ou d'alliage léger.

Lorsque de tels fours sont employés réellement en maintien à température, la puissance nécessaire est utilisée exclusivement pour compenser les pertes : pertes par parois et pertes par rayonnement du dessus du bain, qui reste fréquemment découvert, du moins en cours d'exploitation.

Les pertes par rayonnement de la surface d'aluminium liquide, compte tenu de la faible émissivité du bain (qui est nécessairement propre) sont relativement limitées : de l'ordre de 10 kW/m² à 700° C. Par contre, les pertes par rayonnement de la partie supérieure du creuset sont plus importantes de l'ordre de 40 kW/m², toujours à 700°C.

Les pertes par les parois sont, en général, largement inférieures aux pertes par le dessus du bain.

Prenons l'exemple d'un creuset de 150 kg de capacité d'aluminium, ayant un diamètre de 400 mm (four schématisé dans la figure 15)

- les pertes par les parois du four seront de l'ordre de 2.5 kW ;
- les pertes par la surface d'aluminium liquide de l'ordre de 1.3 kW
- les pertes par rayonnement de 20 cm de collerette non immergée de l'ordre de 10 kW

Lorsque le creuset est métallique, la chute de température entre ses deux faces, pour les valeurs de flux courantes en maintien (de l'ordre de 15KW/m²) est négligeable. Par contre, pour un creuset céramique, cette chute peut présenter une certaine valeur :

- ✓ de l'ordre de 10° C/cm d'épaisseur pour du carbure de silicium ;
- ✓ de l'ordre de 30° C/cm d'épaisseur pour du graphite.

I.15.2. Réajustement de température -fusion:

Fréquemment, exploitant demande, dans un four de maintien, de pouvoir réajuster la température. Cela peut conduire à revoir sensiblement la puissance installée.

Reprenons l'exemple du four de 150 kg de capacité, qui, en maintien seul, nécessite une puissance minimale d'environ 14 kW. Si exploitant envisage de Corriger (en l'augmentant) la température de 25°C d'un apport de 100 kg d'aluminium, celasuppose

un apport d'énergie de 0,33 x 100x 25 soit 825 Wh (la capacité thermique massique de l'aluminium liquide étant d'environ 0,33 Wh/(°C.kg))

Si le réajustement doit être fait en un temps maximal de 10 minutes par exemple, la puissance supplémentaire dont le four doit disposer est de 5 kW.

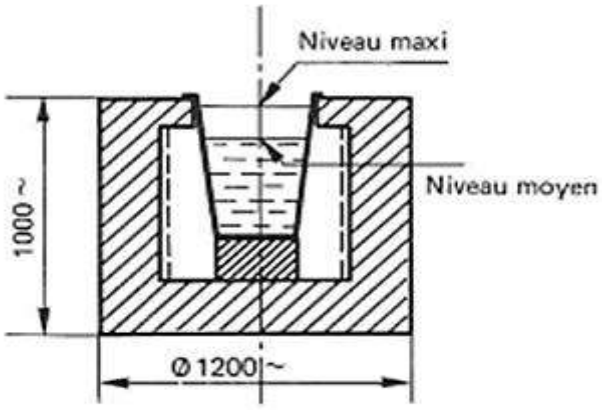


Figure 15. Four à creuset pour maintien et fusion d'aluminium

Cela est encore plus marqué s'il est envisagé d'utiliser le four pour taire un peu de fusion: l'énergie nécessaire pour chauffer á partir de l'ambiante, fondre et augmenter la température de 50°C de L'aluminium est d'environ 320 Wh/kg

Si, toujours dans le même four, l'exploitant envisage la fusion directe de jets de coulée à raison de 30 kg/h par exemple, il faut envisager une puissance Supplémentaire de près de 10 Kw

Il ne faut pas oublier, enfin, qu'une augmentation de puissance, entraîne un accroissement du flux traversant la paroi du creuset donc du gradient de température à travers celle-ci : le fait de passer de 15 à 25 Kw/m² conduit à un gradient de température d'environ 50°C/cm d'épaisseur pour un creuset en graphite.

I.16.Fours sous vide: [3]

I.16.1.Généralités:

Les traitements thermiques dans des fours sous vide peuvent se justifier principalement dans deux cas:

- L’aspect de surface des pièces à traiter ne doit pas être altéré et aucune modification de composition du métal, en surface, n'est à apporter : l’atmosphère contrôlée des fours conventionnels est alors remplacée par le vide.
- le traitement thermique proprement dit s'accompagne d'un dégazage du matériau constituant la charge, si ce dégazage doit être poussé, le vide s'impose.

La construction des fours étant pratiquement réservée à un petit nombre de spécialistes,

C’est ainsi que nous nous limiterons à l’examen des seuls fours à paroi froide, puisqu'ils constituent la quasi-totalité des fours sous vide construits actuellement. Dans ce cas, la carcasse du four est constituée d'une enveloppe à double paroi formant un water-jacket à circulation d'eau.

Accompagnée d'une réalisation particulière de L’isolation thermique, cette technique permet d'obtenir des fours à très faible inertie thermique mais avec des déperditions calorifiques importantes : ce sont les deux principales caractéristiques du point de vue énergétique - des fours sous vide.

L'absence d'atmosphère exclut l'utilisation de la convection, les échanges thermiques ne peuvent donc se faire que par rayonnement.

A ce problème d'échanges par rayonnement- qui se résout exactement comme dans le cas des fours conventionnels s'ajoute celui du maintien du vide dans une enceinte chaude.

Dans ce cas, apparaissent en effet des phénomènes physiques, que nous n'avons pas rencontrés dans les fours classiques dégazage, voire évaporation ou sublimation de certains matériaux pouvant constituer la charge

Rappelons en effet que les pressions rencontrées dans le cas de traitements thermiques sous vide sont de l'ordre de 10^{-3} Torr (1 Torr =1 mm de mercure = 1,3 mbar)

Un examen rapide de la figure 8. Montre que certains métaux courants, présentent, à 1100°C par exemple, une tension de vapeur supérieure à 10^{-3} Torr ; dans ces conditions de température et de pression, ces métaux se vaporisent.

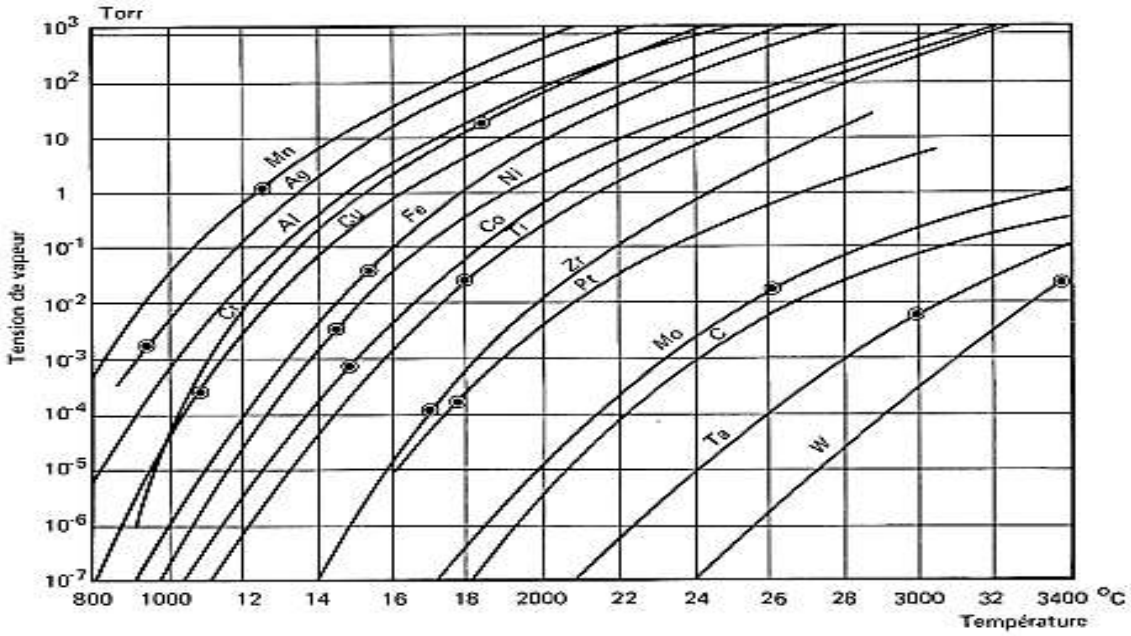


Figure16. Tension de vapeur dans des métaux en fonction de la température

I.16.2.Choix des résistances :

Les fours industriels sous vide sont donc équipés de deux types principaux de résistances :

- Résistances en graphites ;
- Résistances en molybdènes ;

Quelle que soit la nature de la résistance, un problème doit être résolu de façon parfaite l'étanchéité des traversées de courant. Cette étanchéité ne peut être réalisée que si la traversée est pratiquement froide. Ceci nécessite donc un refroidissement de la traversée (par circulation d'eau propre dans cette pièce) d'autant qu'elle est parcourue en général, par un courant important.

Pour avoir une idée de portance des puissances installées et de leur répartition, nous pouvons donner deux exemples de fours industriels classiques :

Type de four	**Dimension utiles en mm**	**Puissance installée KW**		
		Résistance	**Pompes**	**Turbine**
Four à sole horizontale Four vertical	450x 600 x 300Φ =1500 h=1200	90 410	7 30	45 75

Tableau 5. Four industriels classique

Chapitre II : Système de commande dans un four :

Dans ce chapitre, nous allons essayer de comprendre le fonctionnement du four, c'est-à-dire son système de commande. Le control de température est indispensable pour conduire un four avec précision. Le dispositif de chauffe d'un four électrique se compose de résistances reliées à une alimentation électrique. Le rôle du régulateur est de commander cette alimentation électrique par action sur un relais statique de puissance pour permettre au four de suivre automatiquement une "allure" de chauffe selon un programme établi. Il permettra le passage du courant dans les résistances pour suivre très précisément la courbe de cuisson programmée. Pour cela il doit surveiller la température du four par l'intermédiaire d'un capteur de température.

Le système de commande doit comprendre :

- le four et ses résistances,
- le contacteur de puissance ou un relais statique,
- l'alimentation de puissance électrique du four (secteur 220V),
- Un régulateur de température,
- Le capteur de température (thermocouple).

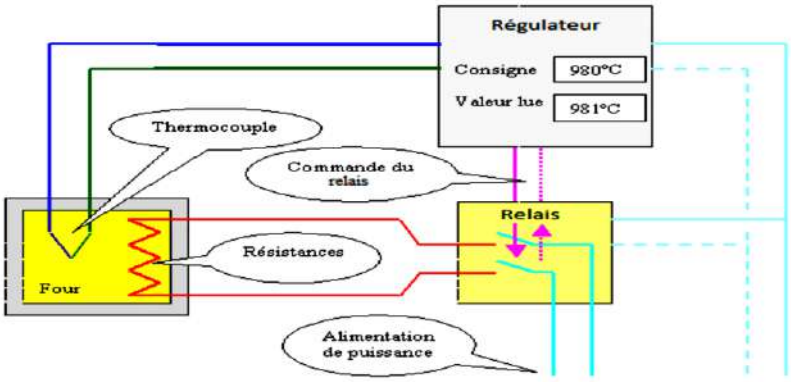


Figure 17. Schéma simplifié d'un système de commande d'un four à résistor

II.1. La résistance :

Le four est chauffé par des résistances boudinées, réparties de façon uniforme sur les piédroits.

L'exemple porte sur la réalisation de fours de faible puissance, entre 1kW et 5kW avec du fil à résistance de résistivité 1,45 Ohm.mm²/m (type Kanthal A1 ou Pyromax PRM) dont le diamètre va de 1 mm à 2,5 mm (façonnable à la main).

Il faut en premier définir la puissance à installer selon la taille du four. Il est bien entendu que ce ne sont pas des fours de course, et qu'ils sont destinés la plupart du temps à cuire des objets fragiles en montée de température libre (sans régulation, donc à pleine puissance). La montée en température doit dans ces conditions respecter les produits tout en ne s'éternisant pas trop. Par exemple, une cuisson à 1000°C pourra durer en chauffe entre 5 et 6 heures, ou plus selon la charge. Cette vitesse de montée en température convient parfaitement aux faïences pour cuisson de biscuits, d'émail ou de décors.

La règle suivante a déjà fait ses preuves pour des petits fours destinés à cuire de la faïence (1100°C) :

Capacité utile* en Litres	**Puissance en Kw**	**Nombre d'éléments**	**Long. des éléments en mm**	**Diamètre extérieur du boudinage en mm**
10	1,2	8	200	23 à 25
25	2,0	8	270	23 à 25
40	2,7	10	300	30 à 32
60	3,2	10	350	30 à 32
80	4,0	12	390	30 à 32
110	5,0	12	440	30 à 32

Tableau 6.fours destines à cuire de la faïence

Ces valeurs peuvent être légèrement bousculées, ce sont malgré tout de bons repères.

II.2.La capacité utile est le volume maximal que les pièces à cuire peuvent occuper dans le four :

Ces fours sont destinés à l'usage sur le réseau électrique domestique dans des conditions aisées jusqu'à une puissance de 3,3 kW (Ils peuvent se brancher sur toutes les prises 15 A). Au-delà il faut disposer de conditions d'alimentation supérieures.

Exemple d'un four de 64 litres utiles (400 x 400 x 400 mm), qui est le compromis de dimensions le plus recherché par les céramistes amateurs et certains professionnels (décorateurs main) :

Puissance four : 3300 watts = Paf

Tension Alim : 220 volts = Ta

Nbre résistances : 10 éléments

Branchement : en série / montage sur tube céramique

Tension / élément : 22 volts = Te

Puissance / élément : 330 watts = Pet

Ceci concerne les éléments et leur possibilité d'alimentation. La puissance indiquée est celle recherchée lorsque le four est dans son domaine le plus élevé de température (entre 1000 et 1100°C)

L'alliage des résistances :

Plusieurs alliages présents sur le marché sont à base de Fer-Chrome-Aluminium (sorte d'inox réfractaire) et présentent des caractéristiques voisines. Nous avons choisi un alliage de résistivité 1,45 Ohms qui sont assez courant dans ce domaine d'application.

Ci-après un tableau indiquant la résistance au mètre (Rama) de différentes grosseurs de fils de cet alliage, utile pour les calculs qui suivront.

Rama en Ohms	ø du fil en mm
1,8462	1,00
1,0924	1,30
0,8020	1,50
0,5698	1,80
0,4615	2,00
0,3490	2,30
0,2954	2,50

Tableau 7.grosseurs de fils

Facteur de température 1,04 = **Fe**

Le facteur de température sera utilisé pour corriger de la valeur Ohmique de l'élément à la température d'utilisation du four (plus de 1000°C).

Taux de charge = **Tch**

Le taux de charge en watts par cm² représente l'émission de puissance par la surface du fil. Cette valeur peut être comprise entre 1 et 1,8 pour le type de montage envisagé. Par exemple, lorsque les résistances sont encastrées dans des parois le taux de charge doit être faible pour permettre la diffusion de la puissance sans surchauffer le fil.

L'exemple se poursuit en choisissant un taux de charge très raisonnable de 1,1 w / cm² (qui évitera aux résistances un vieillissement trop rapide).

a) Calcul de la résistance d'un élément à 20°C :

(Température ambiante des conditions de boudinage du fil)

R20°C = (Te)² / Pet / Fe

Soit : (22 x 22) / 330 / 1,04 = **1,41 Ohms**

b) Calcul du diamètre de fil idéal pour ces valeurs :

Ø fil = (Fe / 3.14) x Racine cubique de [((Pet / Te) ² x Ras x Fe) / Tcx))]

Soit :

= (1.04 / 3.14) x Racine cubique de [((330 x 330 / 22 x 22) x 1,45 x 1,04) / 1,1]

= 0.3312 x Racine cubique de [(225 x 1,45 x 1,04) / 1,1] = 0.3312 x 6,755 **= 2,24 mm**

Problème :

Il faudrait du fil de diamètre 2,30 mm mais nous devons arrondir à 2,0 mm car nous n'avons que ce fil en marché.

Poursuite du calcul en se basant par défaut sur un diamètre de fil de 2 mm

Pour ce diamètre de fil on retrouve dans le tableau 2 la valeur correspondant à la résistance au mètre de l'alliage :

Rama = 0,4615

c) Calcul de la longueur de fil nécessaire à l'élément "L_e" :

L_e = R20°C / Rama

= 1,41 / 0,4615

= 3,055 m **arrondi à 3,06 m**

d) Encombrement des éléments :

Pour un volume utile de 64 litres on a retenu un nombre de 10 éléments pouvant chacun occupé une longueur de 350 mm sur les parois du four (voir 1er tableau ci-dessus).

Le diamètre de boudinage peut être compris entre 30 et 32 mm (Boudinage sur un tube ø20 int-27ext).

Pour du fil de ø 2,0 mm on va obtenir : 27 + 2,0 + 2,0 = 31,0 mm

e) Nombre de spires à boudiner :

Cette valeur qui n'est pas indispensable permet d'évaluer ensuite si l'élément aura une forme compatible avec son utilisation notamment concernant l'espace nécessaire entre chaque spire**.**

Diamètre moyen d'une spire = ø est boudinage - ø fil = 31 - 2 = 29 mm

Développé d'une spire = π x 29 = 3.14 x 29 = 91,06 mm

Nombre de spires à boudiné = Le / 91,06

= 3060 / 91,06 = 33,60 **arrondi à 34 spires**

f) Pas entre chaque spire :

Le pas sera égal à la longueur disponible divisée par le nombre de spires :

Pas = 350 mm / 34 = 10,29 mm

L'espace entre chaque spire sera de : **Pas - fil**

= 10,29 - 2,0 **= 8,29 mm**

En règle générale pour que la résistance fonctionne correctement le Pas doit être au minimum égal au double du diamètre du fil.

Ce qui est vérifié ici puisque 8,29 / 2,0 = 4,14 (>> à 2).

g) Vérifier si le taux de charge final est conforme à celui fixé au début de ce calcul :

Plusieurs valeurs ont été changées ou arrondies dans les calculs, cela peut avoir modifié la valeur du taux de charge envisagée au départ qui était fixée à : Tcx = 1,1 watt / cm²

Tcx final = Pet / (pi x fil x 10 x Le)

= 330 / (3, 14 x 2,0 x 10 x 3,06)

= 1,717 watt / cm²

Cette valeur bien plus haute que l'objectif reste convenable pour le type de montage envisagé (résistance montée sur tube céramique). Il est donc possible de réaliser cetype de four avec du fil de 2 mm de diamètre. Les résistances auront peut-être une durée de vie plus courte, mais cela a un avantage certain : le fil de diamètre 2 mm se travaille facilement à la main.

h) Calcul de la quantité de fil nécessaire :

La masse volumique des alliages Fe-Cr-Al de résistivité 1,45 ohm.mm² / m reste sensiblement égale à 7,10 g / cm³.

Volume d'alliage nécessaire :

10 éléments de 3,06 m chacun

= 10 x 3,06 = 30,60 m

Auxquels il faut ajouter le fil utilisé pour réaliser les sorties de résistances longues de 0,30 m en fil torsadé.

Par résistance : 2 sorties de 0,30 m torsadées

= 2 x 0.30 x 2 = 1,20 m de fil

Pour 10 résistances : 1,20 x 10 = 12,00 m de fil

Longueur totale de fil en cm : 3060 + 1200 = 4260 cm

Volume de métal : longueur x rayon x rayon x π = 4260 x 0,1 x 0,1 x 3,14= 133.76 cm³

Masse de métal : volume x masse volumique

= 133,76 x 7,1

= 949,69 arrondi à 950 grammes

j) Résultat des calculs si le fil de diamètre 2,3 avait été en stock :

Résistance au mètre : Rama = 0,349 Ohm / m

Longueur de fil par élément : Le = 4,04 m

Nombre de spires : 43
Pas des spires : 8,14 mm
Vérification du pas : 8,14 / 2,3 = 3,54 > 2 = OK
Taux de charge final : 1,13 w/cm²
Longueur de fil avec les sorties par élément : 4,04 + 1,20 = 5,24 m
Masse d'alliage à approvisionner : 1556 g d'alliage (prévoir 2 kg)

Chapitre III :Les réfractaires : [3]

On va aborder le constituant principal d'un four qui est le réfractaire. Le four est composé de 2 couches de réfractaire :

- ✓ La première couche est un réfractaire à base de kaolin, après cuisson on obtient la mullite.
- ✓ La seconde couche est en réfractaire isolant qui est un produit siliceux ayant un teneur élevé en silice (85 à 93%) et une teneur en alumine supérieure à 5%, nommés par certains pays produits de silice à liant argileux.

III.1.Les réfractaires :

III.1.1.Définition :

D'après la norme AFNOR NF B 40-001, les réfractaires sont des matériaux autres que les matériaux métalliques et alliages, sans que soient exclus ceux contenant un constituant métallique, dont la résistance pyroscopique est équivalente à 1500°C au minimum. Cette caractéristique correspond à la température à laquelle un échantillon de produit, soumis à une élévation graduelle de température, s'effondre sous son propre poids. Dans leur grande majorité, ces réfractaires sont constitués d'un mélange de composants cristallisés et vitreux.

La variété des matériaux réfractaires est telle que leur classification peut être abordée de différentes manières : mode de fabrication, nature chimique et minéralogique, densité, forme. En se limitant à la classification par leur forme, les réfractaires sont divisés en deux grandes familles :

- ❖ Les réfractaires non-façonnés (ou monolithiques) sont des produits livrés en vrac, généralement sous forme de mélanges pulvérulents, et qui nécessitent donc une mise en forme avant l'emploi. Ils sont constitués de bétons, pisés, ciments, coulis, pâtes plastiques.
- ❖ Les réfractaires façonnés se représentent sous la forme définitive dans laquelle ils seront mis en œuvre : il s'agit de briques ou de pièces de forme, de dimensions et formats divers.

III.1.2.Constituants :

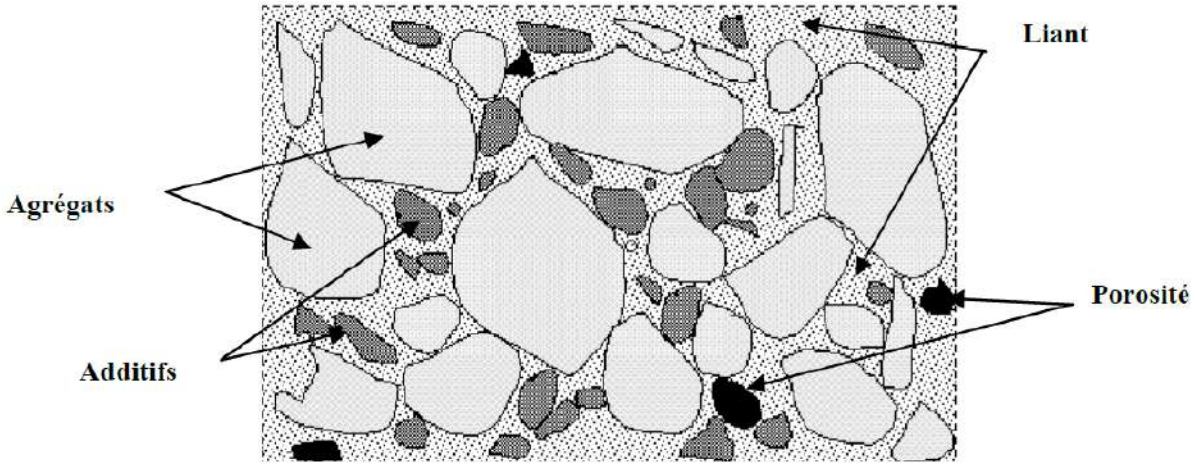


Figure 18 : Schéma de la microstructure d'un réfractaire

A l'exception des réfractaires électro fondus, qui sont fabriqués par la fusion des matières premières, les produits réfractaires sont des céramiques fortement hétérogènes figure 18, toujours polyphasées, comportant un squelette plus ou moins grossier (les agrégats pouvant atteindre des tailles de quelques millimètres) lié par une matrice de granulométrie fine (schématiquement constituée d'une liaison et d'additifs). S'ajoute à ces différents constituants une phase supplémentaire constituée par la porosité importante (ouverte et fermée) de la céramique qui contribue largement à fixer les propriétés du matériau.

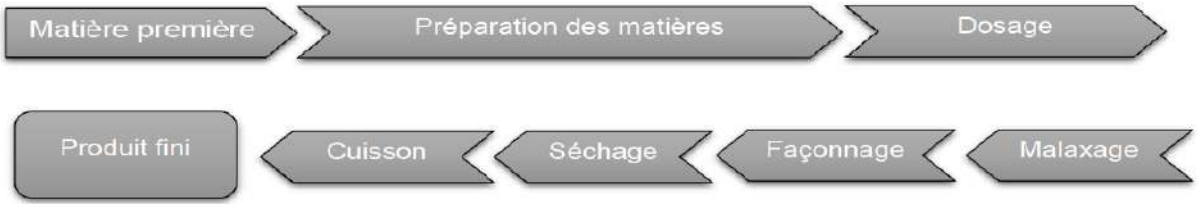
En général, les produits réfractaires sont préparés à partir d'un mélange de matières premières de granulométrie définie figure 18 formé :

- D'agrégats (minéraux naturels ou synthétiques) qui constituent le support réfractaire proprement dit : ils conditionnent les caractéristiques principales du réfractaire fini et constituent la répartition granulométrique la plus grossière duproduit .
- d'un liant approprié assurant la cohésion de l'ensemble des constituants des produits réfractaires. Une partie des matières ajoutées comme liant n'a pas toujours un caractère réfractaire : en général, celles-ci sont additionnées en faible quantité et appartiennent toujours à la fraction fine de la granulométrie des produits finis.

- d'additifs destinés à renforcer les caractéristiques de la matrice du réfractaire. Ils sont ajoutés sous formes de particules ou de poudres de synthèse, fine et ultra fines, et ayant les caractéristiques suivantes : grande pureté, distribution granulométrique étroite, surface spécifique adaptée, grande réactivité chimique…

III.1.3.Procédés de fabrication :

On peut procéder à plusieurs méthodes selon l'opérateur. Mais ces méthodes se différencient au niveau du façonnage. Voici le schéma qui représente le procédé général d'obtention des céramiques :



III.1.3.1. Préparation des matières premières :

Est constituée de plusieurs étapes, dont le but est d'assurer la bonne continuation du processus:

- ✓ **Séchage des matières premières :**Le but c'est de faciliter le broyage mais surtout afin d'assurer un dosage en poids correct il faut opérer sur des matières séchées ne possédant pas une teneur en humidité variable, ce qui n'est pas toujours facile.
- ✓ **Broyage et concassage :**Ces opérations consistent à réduire les matières premières en poudre fine car au cours du processus on opère avec des produits finement broyés et pour assurer aussi l'homogénéisation lors des mélanges.
- ✓ **Tamisage :**un réfractaire est céramique fortement hétérogène c'est-à-dire composé par des éléments de granulométrie différent (grossier et fines). C'est lors de cette étape que l'on définit la granulométrie de chaque matière première.
- ✓ **Dosage :**Le dosage se fait soit en poids soit en volume selon l'opérateur. Le dosage en volume est surtout employé dans les productions en continues.

Le choix de mélange des matières premières est guidé par diverses considérations : matières premières à la disposition, nature des produits à obtenir, caractéristique physique et chimique, mode de façonnage qui sera employé.

La quantité d'eau ajoutée pour réaliser la pâte dépend, évidemment, du type de fabrication et du mode de façonnage; plus la pression du moulage sera forte, moins il faudra d'humidité; pour le moulage à sec il y aura une teneur critique en humidité où la compacité sera maximale.

III.1.3.2.Malaxage :

Il faut malaxer le mélange pour assurer une parfaite homogénéité, répartir l'humidité et chasser l'air le plus possible car l'air diminuera nettement la plasticité et peut aussi provoquer des défauts dans la texture.

III.1.3.3.Façonnage :

L'opérateur peut choisir plusieurs modes de façonnage :

- ✓ Ceux qui exploitent la propriété plastique de la pâte utilisent : le moulage, pressage, tournage et le calibrage
- ✓ Ceux qui se basent sur la suspension aqueuse utilisent le coulage

III.1.3.4.Séchage :

Cette opération est fort délicate car le séchage est toujours accompagné d'un retrait plus ou moins important dû à l'évaporation de l'eau qui provoque une contraction de la pâte.

Lorsqu'on humidifie l'argile (incorporée dans la pâte), l'eau vient adhérer aux particules d'argiles et forme autour d'elles une pellicule d'eau, si la particule est rugueuse ou spongieuse, l'eau s'infiltrera ; les colloïdes de l'argile vont, en présence de l'eau, se gonfler et donner une couche gélatineuse ; enfin, il y aura de l'eau en excès qui sera interposée entre les particules, cette eau aura une grande influence sur la consistance de la matière.

Lors du séchage, ce sera cette dernière eau qui partira la première, les particules se rapprocheront, provoquant un retrait qui sera fonction de la quantité d'eau évaporée ; ensuite, c'est l'eau formant une pellicule autour des particules et qui adhère à celle-ci superficiellement qui va disparaître, amenant un nouveau rapprochement, donc un nouveau

retrait, mais qui sera moins important que le premier. Enfin, à une température légèrement supérieure, l'eau des couches gélatineuses s'évaporera en provoquant un retrait extrêmement faible. Mais les particules, du fait de leur rugosité de surface ne viendront pas complément en contact et il se produira des vides.

III.1.3.5.Cuisson :

Cette dernière étape consiste à soumettre la pâte à une variation de température (échauffement et refroidissement). Les mécanismes de frittage constituent une approche simplifiée de l'opération de cuisson, en ne décrivant que les phénomènes coalescence des particules à haute température.

Au cours du montée du en température, se produit une série continue de phénomène :

- ✓ Fin de séchage du produit (100 à150°C)
- ✓ Décomposition des minéraux à 300 à 1000°C
- ✓ Combustion des matières organiques à 400 jusqu'à 800°C
- ✓ Formation de nouvelle phase par réaction de SiO_2 et Al_2O_3 (900°C)

III.1.4.Sollicitations des réfractaires :

Les matériaux réfractaires sont sollicités dans des conditions extrêmes de température et subissent des dégradations d'origine :

- ✓ **mécaniques :** compression, traction, vibration, abrasion, érosion…
- ✓ **thermiques :** choc thermique, blocage de dilatation thermique, fatigue thermique…
- ✓ **chimique :** corrosion.

III.1.5.Corrosion des réfractaires :

Dans le domaine des réfractaires, le terme corrosion désigne l'ensemble des réactions chimiques entre les agents d'agression (bain ou métal liquide, gaz) et le réfractaire. Cette corrosion est toujours accompagnée d'une dissolution des phases constituant le réfractaire. La corrosion peut donc être définie comme un ensemble de réactions thermochimiques entre deux milieux : le milieu agressif (métal, gaz) et le matériau réfractaire.

Lorsque le réfractaire est mis en contact avec des phases liquides, la corrosion est généralement due à des réactions de dissolution (avec ou sans précipitation), à des réactions d'oxydo-réduction (par exemple entre des oxydes solides (SiO_2) et des éléments métalliques

liquides) ou à des mécanismes réactionnels plus complexes conduisant à la formation de nouveaux composés. Lorsque la corrosion se produit en phase gazeuse, les mécanismes mis en jeux sont fréquemment des réactions de réduction, d'oxydo-réduction ou une combinaison associant dissociation, volatilisation et condensation.

III.2. Mullite :

La mullite (3Al2O3, 2SiO2), découverte par Bowen en 1924, constitue la première couche de réfractaire de notre four. C'est un constituant largement utilisé dans la fabrication des pièces céramiques industrielles, notamment dans les matériaux réfractaires ou les composites grâce à ses très bonnes propriétés thermomécaniques, et à sa bonne résistance aux chocs thermiques due à un faible coefficient de dilation (<6.10-6 K-1).

La mullite peut être obtenue à partir de matières premières peu onéreuses telles que la kaolinite (Al2O3, 2SiO2, 2H2O), la sillimanite (silicate naturelle d'aluminium), la cyanite ou l'andalousite (Al2O3, 2SiO2), ou par voie sol-gel. Mais dans notre cas on va essayer de l'obtenir par l'intermédiaire de la kaolinite. C'est la seule phase stable du diagramme SiO2-Al2O3.

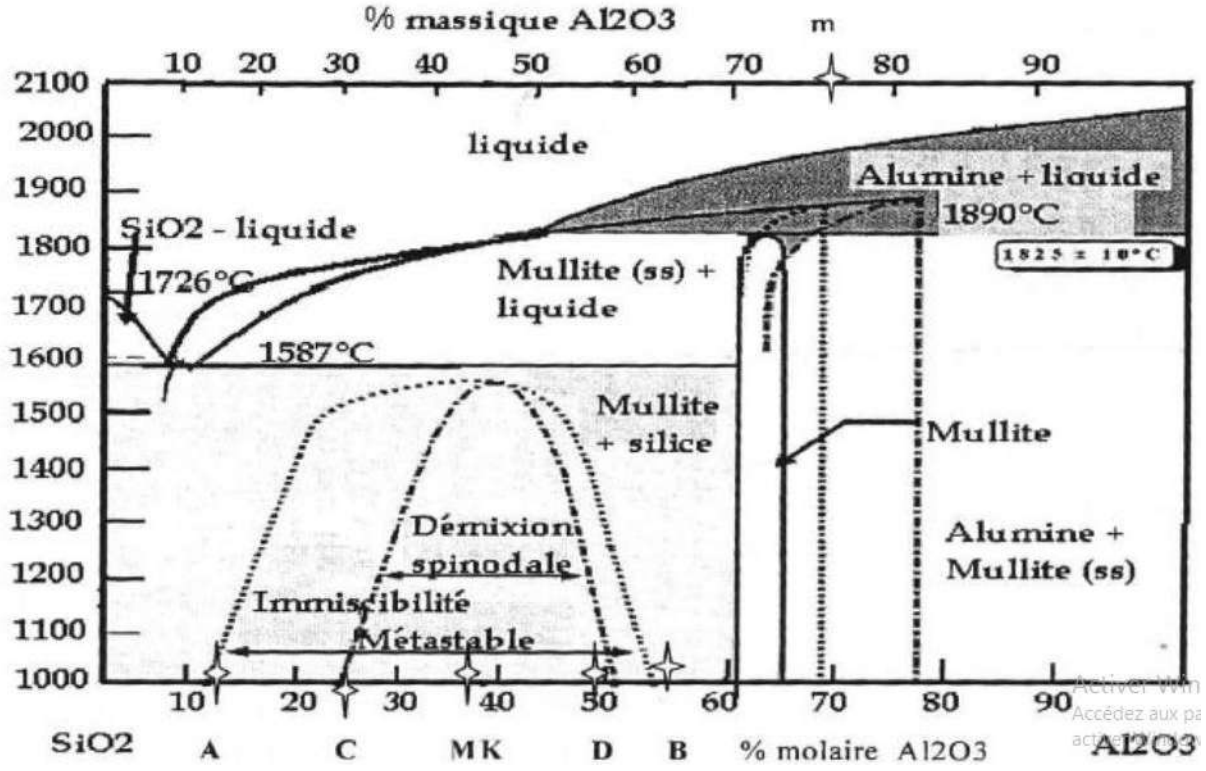


Figure 19 : Diagramme de phase du système Al2O3-SiO2

L'apparition de la mullite est très importante dans la consolidation des produits céramiques silicatés car cela crée un réseau de cristaux aciculaires plus ou moins organisé rigidifiant le matériau à haute température et augmentant sa résistance mécanique après cuisson.

III.2.1.Matière première : le kaolin :

Le kaolin est une roche composée essentiellement de kaolinite, résultant de la décomposition des granites et des feldspaths par hydrolyse sous un climat chaud et humide, ou par une action hydrothermale.

- La kaolinite provient généralement de l'hydrolyse de n'importe quel minéral ou verre silico-alumineux. Par exemple la formation de kaolinite à partir de feldspath potassique peut s'écrire :
  $K2O{\cdot}Al2O3{\cdot}6SiO2(s) + 2H2O\ (aq) \rightarrow Al2O3{\cdot}2SiO2{\cdot}2H2O(s) + 4SiO2(s) + K2O$ Le processus ci-dessus conduit à des kaolins dits primaires, en contact direct avec la roche silico-alumineuse qui leur a donné naissance.
- Les kaolins dits secondaires ont pour origine des kaolins primaires entraînés par les eaux de ruissellement puis déposés. Les gisements de kaolin sédimentaire se rencontre dans les dépôts continentaux à épicontinentaux, mis en place en général au cours de cycles transgression régression. Ils peuvent être rencontrés à différentes époques géologiques durant lesquelles prévalait un climat de type tropical favorisant une intense altération.

II.3. Réfractaire silico-argileux :

Les réfractaires silico-argileux représentent un tonnage extrêmement important., la majorité des réfractaires sont constitués par des phases cristallisés et vitreux c'est-à-dire polyphasique. Dans le cas de ce matériau on a comme squelette la silice (agrégat naturel) et comme liant la mullite (obtenue par cuisson de l'argile kaolinitique).

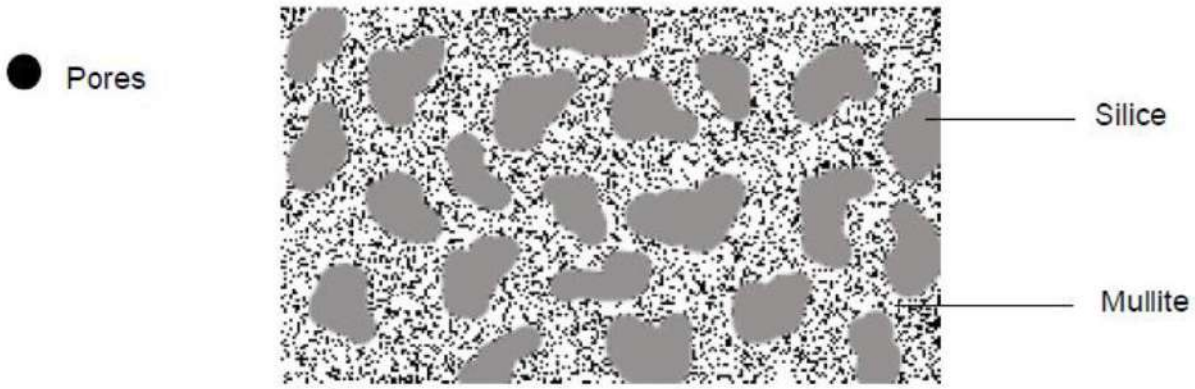


Figure 20 : Structure d'un réfractaire silico-argileux

III.3.1. Critère de choix des isolants :

Le choix d'un isolant dépend, en premier lieu, de la valeur de son coefficient de conductivité : plus celui-ci sera faible, plus l'épaisseur de l'isolant à prévoir sera réduite. Dans un isolant, la chaleur progresse à la fois :

- ✓ par conduction à travers le gaz (l'air généralement) immobile dans les pores ;
- ✓ par convection dans le gaz occlus dans les pores;
- ✓ par conduction à travers la matière première emprisonnant les cellules d'air ;
- ✓ enfin, par les éléments solides du matériau, étant à des températures différentes, échangeant entre eux de l'énergie sous forme de rayonnement.

On comprend, dans ces conditions, que le transfert de la chaleur à travers un isolant est un phénomène extrêmement complexe dépendant de nombreux facteurs, parmi lesquels :

- ➢ la porosité,
- ➢ la masse volumique apparente du matériau,
- ➢ la température moyenne dans l'isolant,
- ➢ la composition chimique du matériau,
- ➢ l'humidité incluse dans l'isolant.

III.3.1.1. Influence de la porosité :

On conçoit que le coefficient de conductivité d'un corps poreux se situe entre celui de l'air contenu dans les pores et celui des parties solides de l'isolant considéré. Si on appelle « p » le facteur de porosité, la formule de Carman s'exprime :

$$p = \frac{K}{S^2}\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}$$

Avec

ε : Porosité accessible ou ouverte.

S : surface développé par unité de volume de phase solide.

K : un coefficient de forme compris entre 3,6 et 5 sans dimension.

III.3.1.2. Influence de la masse volumique apparente :

L'évolution du coefficient de conductivité, étudiée en fonction de la masse volumique tend donc, pour les isolants poreux à passer par un minimum (pour une valeur propre à chaque type d'isolant) puis à augmenter légèrement au-delà.

III.3.1.3. Influence de la composition chimique :

La composition chimique de la partie solide composant l'isolant d'une part, et celle du gaz occlus dans les pores, d'autre part, ont une influence considérable sur le coefficient de conductivité.

- Composition chimique des parties solides
- Nature du gaz occlus dans les pores

III.3.1.4. Influence de la température :

On constate que le coefficient de conductivité croit, en général, avec la température. Cela est dû principalement à l'influence du rayonnement, accroissement proportionnel L'équation de la conductivité en fonction de la température absolue se présente sous la forme :

$$\left[\frac{\boldsymbol{W}}{\boldsymbol{m}}.°\boldsymbol{C}\right]\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{a}\sqrt{\boldsymbol{T}} + \boldsymbol{bT^3}$$

où a et b sont des constantes caractéristiques de l'isolant considéré et T la température absolue.

III.3.1.5. Influence de l'humidité :

A l'origine, il semblerait qu'au contraire, le remplacement progressif de l'air sec dans les cellules, par de la vapeur d'eau devrait conduire, théoriquement, a une amélioration du coefficient de conductivité apparente.

Mais, en réalité, l'humidité a pour effet d'augmenter considérablement le coefficient de conductivité. Puis l'augmentation de λ est ensuite proportionnelle à l'augmentation du taux d'humidité.

III.3.2. Matières premières :

III.3.2.1. La silice :

La silice pure se présente sous la forme d'un minéral dur et existe sous des formes variées dans la nature :

-principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès), elle représente 27 % de la croûte terrestre ;

- fréquente dans les roches métamorphiques ;

- fréquente dans les roches magmatiques : quartz dans les roches magmatiques acides, cristallisée ou amorphe dans les roches volcaniques.

La silice est un matériau transparent dans tout le domaine visible ce qui lui donne des applications intéressantes en optique. Cependant ses propriétés de transparence se perdent dans les domaines UV et infrarouge, ce qui impose l'usage d'autres matériaux pour travailler dans ces longueurs d'onde par exemple en spectrométrie infrarouge. Cet effet est mis à profit dans l'effet de serre où la lumière peut pénétrer mais dont les infrarouges ne peuvent sortir, d'où un échauffement ou, tout au moins, le maintien d'une température plus élevée qu'à l'extérieur sans chauffage.

Partie II :

volet expérimental

Chapitre IV :Choix et présentation du four :

IV.1. Choix du four :

Le choix de concevoir un four électrique de laboratoire repose sur plusieurs raisons :

- Notre laboratoire dispose d'un seul four utilisable pour plusieurs utilisateurs. Alors, le nombre de four est insuffisant.
- L'électricité est une source d'énergie facile à procurer au sein de notre laboratoire c'est pourquoi nous avons conçu un four électrique.

IV.2. Présentation du four :

IV.2.1. Caractéristiques :

Les caractéristiques dépendent principalement de l'utilité du four et aussi des matériels disponibles pour la conception. Nous avons donc conçu un appareil avec les caractéristiques répondant aux exigences de notre laboratoire. Ces caractéristiques sont les suivantes :

Puissance	***3000W***
Branchement	***Monophasé 220V***
Régulation	***PID***
Température max	***1200°C***
Température d'utilisation	***1000°C***
Chauffage	***Par résistor (2 côtés)***
Volume	***64L***
Isolation	***multicouche***
Carcasse	***Acier***
Porte	***Abattant***
Dimension [mm]	***L : 510 ; l : 400 ; H : 320***

Tableau 8. Caractéristiques techniques du four

IV.2.2. Schéma représentatif du four :

Voici quelque dessin technique où l'on peut percevoir notre four :

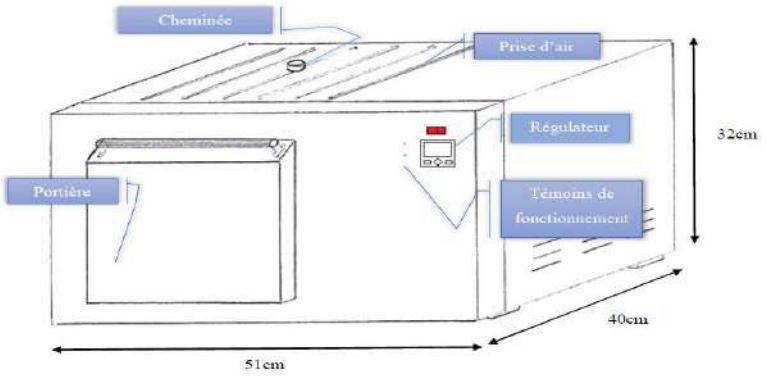


Figure 21. Vue en perspective du four

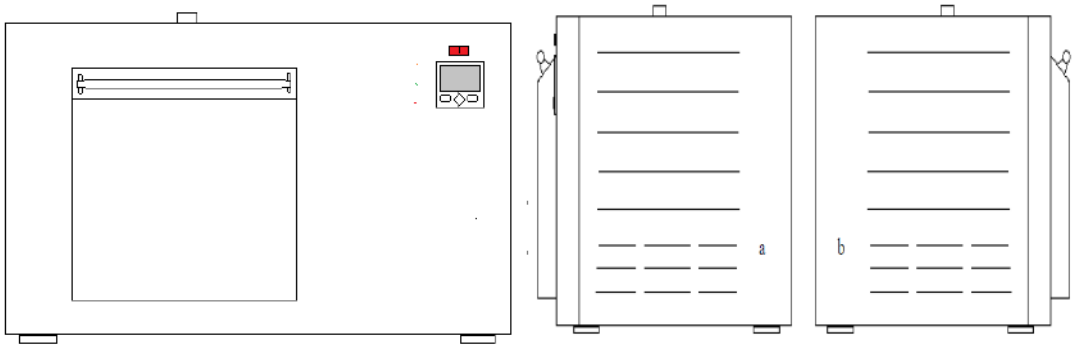


Figure 22. Vue de face**Figure 23.**Vue de droite (a) et vue de gauche (b)

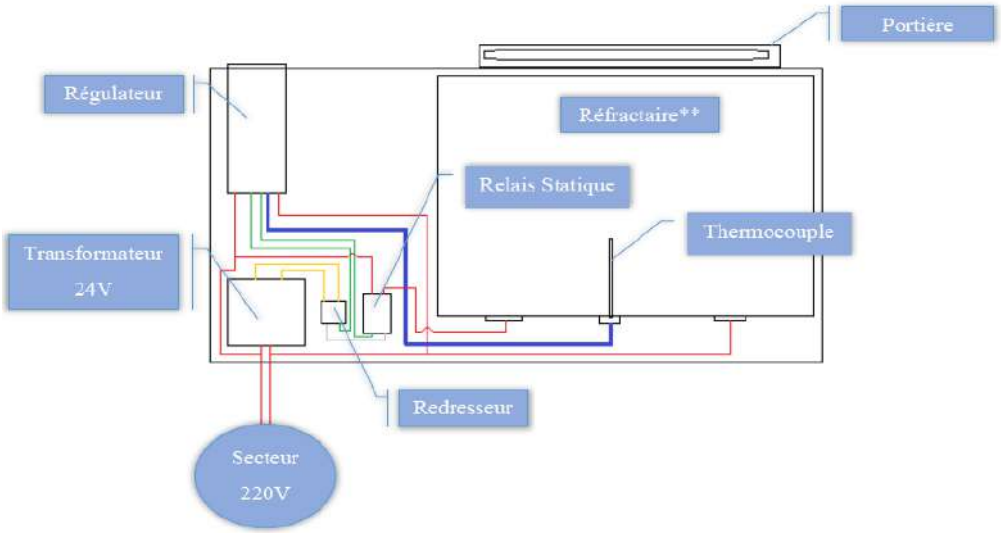


Figure 24. Vue intérieure et câblage

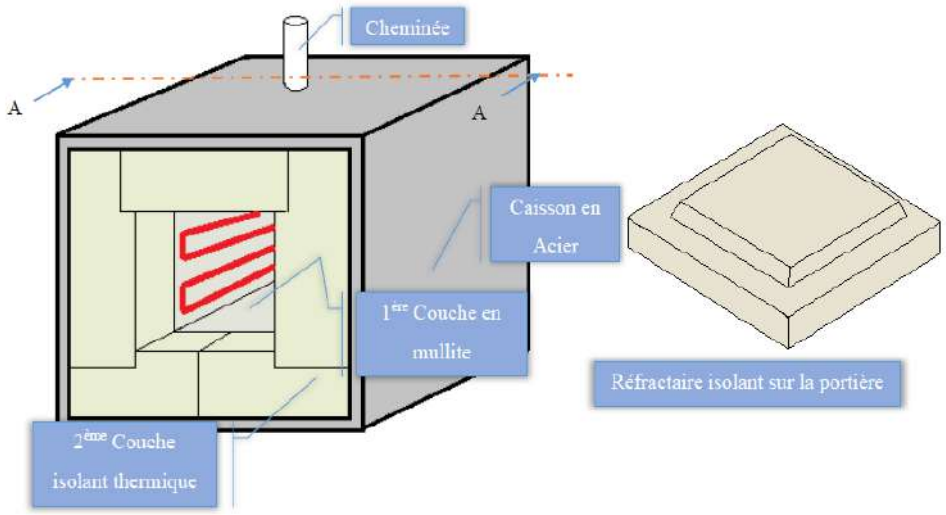


Figure 25. Les réfractaires du four

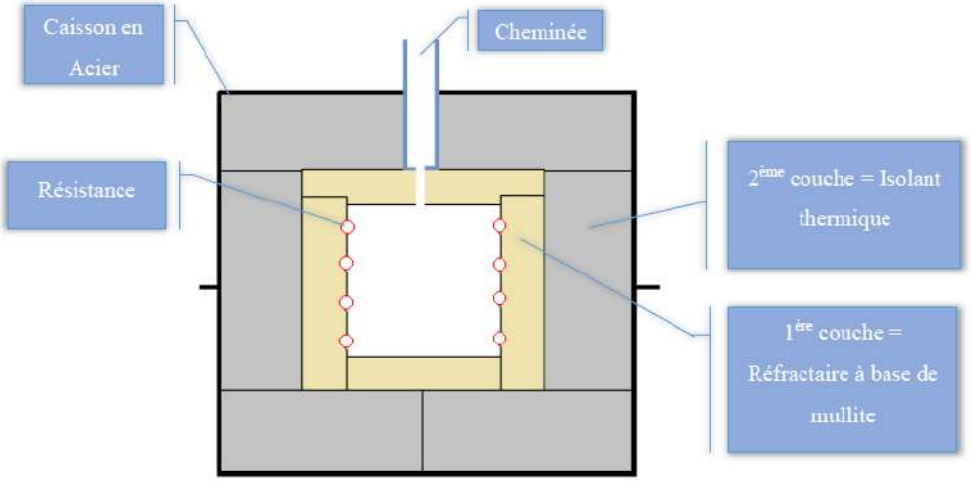


Figure 26. Coupe AA de la couche d'isolement

Chapitre V : Réalisation des couches réfractaires du four :

Notre four est équipé de deux couches de réfractaires :

- La première couche est un réfractaire à base de mullite. Cette couche joue le rôle principal de réfractaire due à sa haute résistance pyroscopique.
- La deuxième couche est un réfractaire silicoargileux. C'est une couche destinée pour l'isolation thermique du four.

La réalisation de ces couches réfractaires a été effectuée dans le laboratoire de chimie minérale de Vontovorona.

V.1. Dimensionnement des pièces :

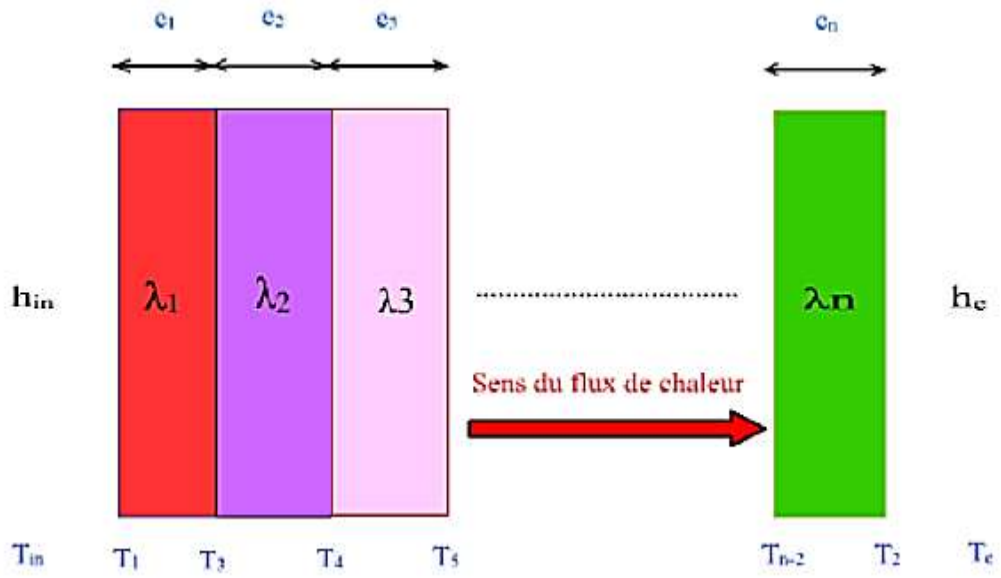


Figure 27. Système d'isolement à n couches

La méthode générale pour calculer l'épaisseur des couches d'isolant a été obtenue à partir du principe général du transfert de chaleur de Fourrier. La formule générale s'écrit :

$$[\text{K cala}]Q = \frac{T_{in} - T_e}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_e}}$$

Avec :

T_{in} : température intérieure du four [°C]

T_e : température extérieure du four [°C]

h_{in} et h_e : coefficient de transmission de chaleur intérieure et extérieure [$Kcalh.m^2.°C$]

T_1 : température de la paroi intérieure

T_2 : température de la paroi extérieure

T_3…….T_{n-2} : température de chaque paroi

λ_1,….,λ_n : coefficient de conductivité thermique de la couche 1….n [$Kcalh.m^2.°C$]

Pour notre four, nous avons deux couches de réfractaires. La formule de fourrier devient :

$$Q = \frac{T_{in} - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_e}}$$

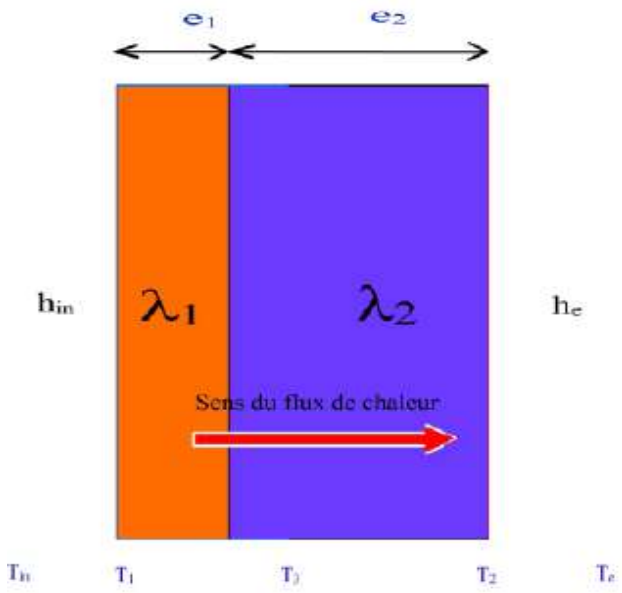


Figure 28. Système d'isolement à deux couches

Dans les conceptions de four, la valeur de Q est imposé par l'ISO pour une valeur de 6900 kcal. Pour déduire les valeurs des épaisseurs des isolants, il faut imposer une valeur à l'un des couches de réfractaire puis de déduire l'autre. Mais pour calculer ces épaisseurs, il faut tout d'abord calculer les valeurs de h_e et h_{in}.

- **Calcul du coefficient de transfert thermique à l'extérieur du four :**

Pour le calcul du coefficient de transfert de chaleur à l'extérieur du four, où il y a présence de la convection et de rayonnement, on peut calculer le coefficient de transmission thermique par la formule de Hottel et Woertz :

$$h_e = 5,67 + 3,86V_v[\frac{Kcal}{m^2}.h.°C]$$

Avec V_v: vitesse du vent (dans les conditions normales V_v1.5 m/s)

AN : $h_e = 5,67 + 3,86 \times 1,5$

$$\mathbf{h_e = 11,46\ {}^{Kcal}/_{h.m^2.°C}}$$

➢**Coefficient de transfert thermique à l'intérieur du four :**

A l'intérieur d'un four, les trois modes de transmissions de chaleur interviennentsimultanément. Le coefficient de transfert thermique à l'intérieur du four qui est désignépar hin, est alors obtenu par la somme:

Avec

hc: coefficient d'échange de chaleur par convection

hr: coefficient d'échange de chaleur par rayonnement

$\mathbf{h_{in}=h_c+h_r+h_k}$ $\mathbf{h_{in}=h_r}$

$\mathbf{h_k}$: coefficient d'échange de chaleur par conduction

Dans les fours électriques à incandescence, seul intervient le rayonnement des éléments chauffants et des parois, la convection jouant un rôle secondaire.

Le coefficient de transmission thermique par rayonnement est obtenu par la relation suivante :$\mathbf{h_r = \pi\sigma\Psi 10^8}$

$$Et\Psi = \frac{(T_1+274)^4-(T_2+274)^4}{(T_1-T_2)} \times 10^{-8}$$

Avec

$\boldsymbol{\pi\sigma}$: Constante de Stefan Boltzmann : 4.91 10-8 kcal/m².h.K4

$\boldsymbol{\Psi}$: Coefficient dépendante de la température

$\mathbf{T_1}$: Température intérieur du four

$\mathbf{T_2}$: Température de la paroi intérieure du four

AN : T_1=1200°C T_2=1150°C

D'où $h_r = \frac{(1200+274)^4-(1150+274)^4}{(1200-1150)} \times 10^{-8}$

$$h_r = 4,91 \times 10^{-8} \times 121,73 \times 10^8$$

$$h_{in} = h_r = 597{,}69 \frac{kcal}{m^2}.h.°C$$

➢**Calcul de l'épaisseur de la couche d'isolant en imposant e_1= 4cm :**

$$e_2 = \left[\frac{T_{in} - T_e}{Q} - \left(\frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_e}\right)\right].\lambda_2$$

AN :avec$\lambda_2 = 1{,}2\ {}^{Kcal}/_{h.m.°C}$ et $\lambda_1 = 5\ {}^{Kcal}/_{h.m.°C}$

$$e_2 = [\frac{1200-25}{6900} - \left(\frac{1}{597{,}69} + \frac{4.10^{-2}}{6} + \frac{1}{11{,}46}\right)] \times 1{,}2$$ e_2=0,0539m

Remarque : les valeurs de conductivité thermique sont des valeurs obtenues par des références bibliographiques. Nous n'avons pas pu effectuer des mesures réelles faute de matériels.

V.2.Processus de fabrication des matériaux réfractaires :

Le processus de fabrication peut se résumer suivant le schéma suivant :

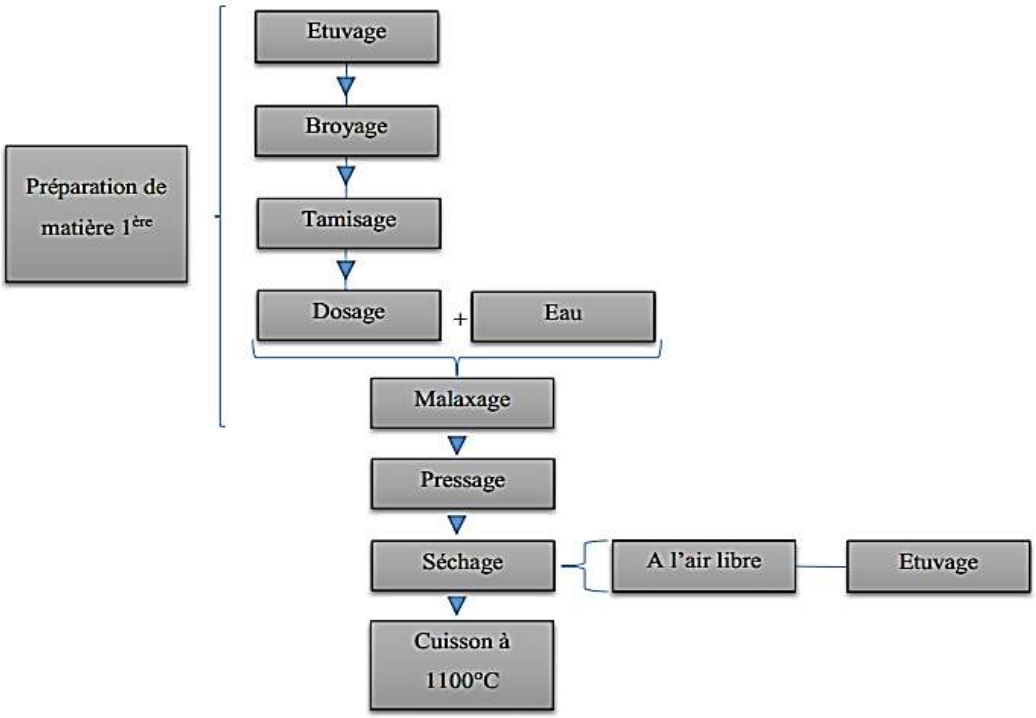


Figure 29. Processus céramique

V.3. Description des matières premières :

Les matières premières que nous avons utilisées sont : le kaolin, la silice, et la sciure de bois. Le kaolin et la silice ont été obtenus auprès de société PROCHIMAD dont les caractéristiques sont fournies par la société elle-même. La sciure a été obtenue auprès d'un atelier de menuiserie.

V.3.1. Kaolin :

Voici la fiche technique du kaolin (Figure 27) de la société PROCHIMAD
Nom : Silicate d'alumine (Kaolin)
Formule chimique : AL2O3, 2SiO2, 2H2O
Caractéristiques physique
➢**Aspect :** poudre fine
➢**Couleur :** Blanc crème
➢**Densité :** 1,07
➢**Refus au tamis 350 :** 3% (30/50 microns)
➢**Granulométrie :** 40 microns
Composition chimique
➢**Perte au feu :** 14,6%
➢**Humidité :** 1%
➢**SiO2 :** 39,8%
➢**Fe2O :** traces
➢**TiO2 :** 1,2%
➢**Al2O3 :** 41,3%
➢**MgO :** 1,4%,
Alcalinité : équivaut à 1,2g de NaOH par Kg de Kaolin
Principales utilisation : Peinture, céramique, savonnerie, pesticide…
Conditionnement : sac de 50Kg (marquage sac: K40)



Figure 30. Kaolin

V.3.2. Silice :

Voici la fiche technique de la silice (figure 28) de la société PROCHIMAD
Nom : **Sable de silice**
Formule chimique : **SiO2**
Gisement : Sur montagne

Couleur:*Blanche*

Granulométrie Supérieure à 200 microns : 5% , Inférieure à 150 microns : 90%

Impureté : Kaolin, argile inférieure à 2%

Humidité à l'état naturel : Inférieure à 8%

Utilisation : Construction, céramique…



Figure 31. silice

V.3.3.Sciure de bois :

Couleur : **Marron**
Taux d'humidité : **9%**
Masse volumique : 0.6g/ml

Composition chimique

- **Carbone (C) :** 49,9%
- **Oxygène (O) :** 41,5%
- **Hydrogène (H)** : 6,2%
- **Azote (N) :** 1,5%
- **Résidu solide** : 0,9%

Point d'inflammation : 240°C



Figure 32.sciure de bois

V.3.4. Formulation et réalisation de la première couche réfractaire :

Comme nous avons déjà vu dans la partie bibliographique, ce matériau est constitué par du kaolin cuit à une certaine température. Nous avons effectué plusieurs tests avant d'établir la formulation exacte du produit.

« Détermination de la quantité d'eau optimale pour la mise en œuvre du procédé par pressage dans le but d'obtenir un produit bien compacte » [4]. Selon la bibliographie, ce procédé nécessite peu de quantité d'eau (entre 10 à 20%). Dans notre étude, nous avons effectué des essais de 10, 15, et 20% d'eau. Réalisation : Nous avons réalisé les échantillons tests en suivant le procédé ci-dessous

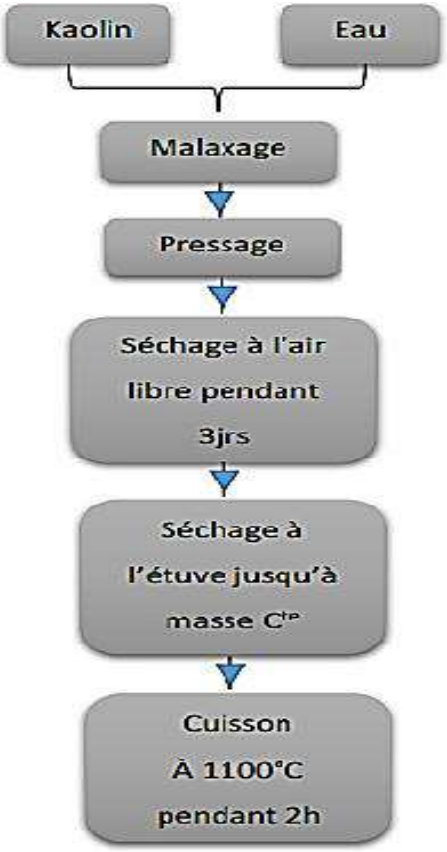


Figure 33. Procédé pour réaliser les échantillons tests

V.3.5. Réalisation du caisson et montage :

Dans cette partie, nous allons détailler la réalisation du caisson et du montage jusqu'à la mise en marche du four. Ce chapitre sera composé de trois parties :

- Réalisation du caisson
- Montage du réfractaire et de la partie électronique du four
- Evaluation de la performance du four

V.3.5.1.Réalisation du caisson :

Le caisson est réalisé avec un acier de 3mm ; sa forme est inspirée par des fours classiques.



Figure 34. Photos du caisson du four

V.3.5.2.Montage :

V.3.5.2.1.Montage du réfractaire :

Les réfractaires sont montés dans un coffret en acier avant d'être introduits dans le caisson. Avant le montage, les pièces subissent quelque mise en forme puis les pièces sont montées de façon à réduire les pertes de chaleur et les interfaces entre les pièces sont garnies par du kaolin.





Figure 35. Photos du montage des réfractaires

V.3.5.2.2.Montage de la partie électronique du four :

Le montage de cette partie repose sur schéma du (figure 33) mais nous avons ajouté des indicateur LED sur le panneau de contrôle. Nous avons utilisé comme régulateur l'ASCON M3 série $\gamma 2$ qui nous offre des multitudes de fonction pourune utilisation flexible ; une manuel d'utilisation est livré avec le four.

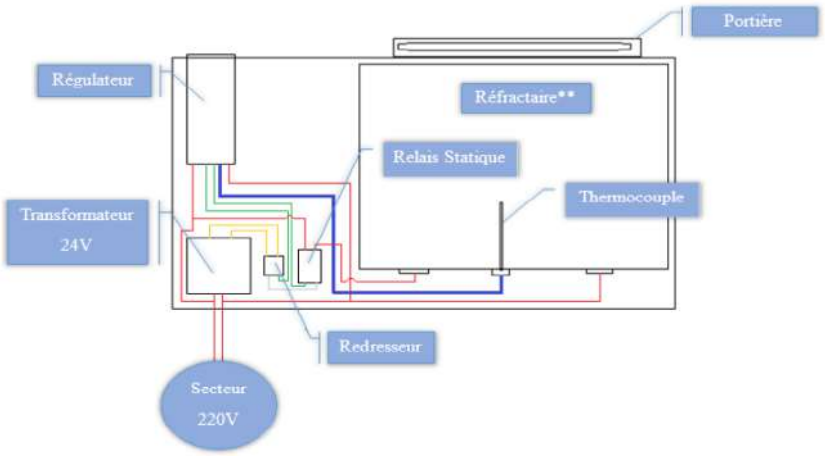


Figure 36.le montage de partie électrique

Signification des indicateur LED

➢**Orange** : Alimentation, cela signifie que la prise est branchée sur secteur

➢**Vert** : Indique que la résistance est défaillant

➢**Rouge** : Activité de la résistance

V.3.5.2.3.Evaluation de performance :

Pour évaluer la performance de notre four, nous avons effectué un test en imposant la vitesse de montée de la température à 10°C/mn puis de comparer les courbes de température en fonction du temps T= f(t) obtenues par calcul et les valeurs réelle. Le but est d'observer son comportement à température élevée et de voir ses limites s'ils sont conformes à la caractéristique prévue

A) Test n°1 : Vm=10°C/mn ; $T0$=25°C ; $Tfin$=1000°C :

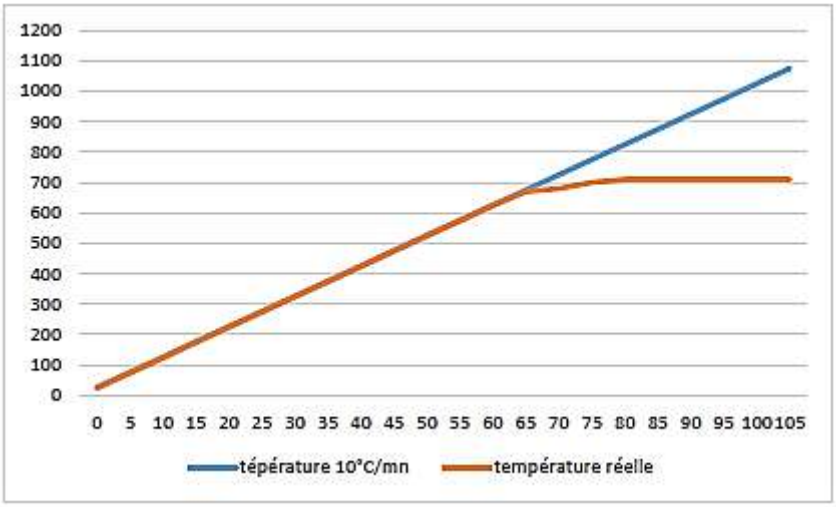


Figure 37. Graphique de performance du four à 10°C/mn

➢Observation :

▪ D'après cette courbe, nous avons constaté que le four n'arrive pas à suivre la consigne de 10°C/mn et sa température s'est bloquée à 710°C.
▪ La température de la portière est brulante depuis 600°C

➢ Interprétation :

Il y a une perte thermique au niveau de la portière. Cela explique la difficulté de la montée de la température jusqu'à 1000°C. Pour y remédier, il faut vérifier l'isolant de la portière s'il est

bien accolé au bord du réfractaire. Si c'est le cas il faut remplacer avec un autre isolant thermique.

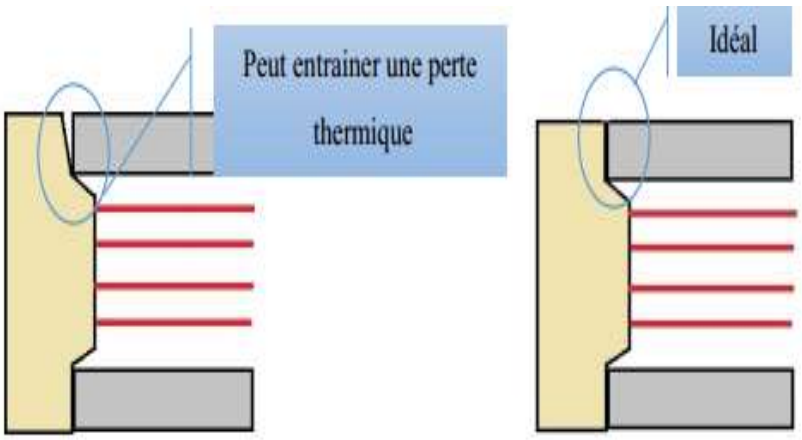


Figure 38. Coupe de la portière d'un four

D'après notre inspection, nous avons constaté que le bord ne s'accole pas et nous avons corrigé le problème.

B) Test n°2 : Vm=10°C/mn ; $T0$=25°C ; $Tfin$=1000°C :

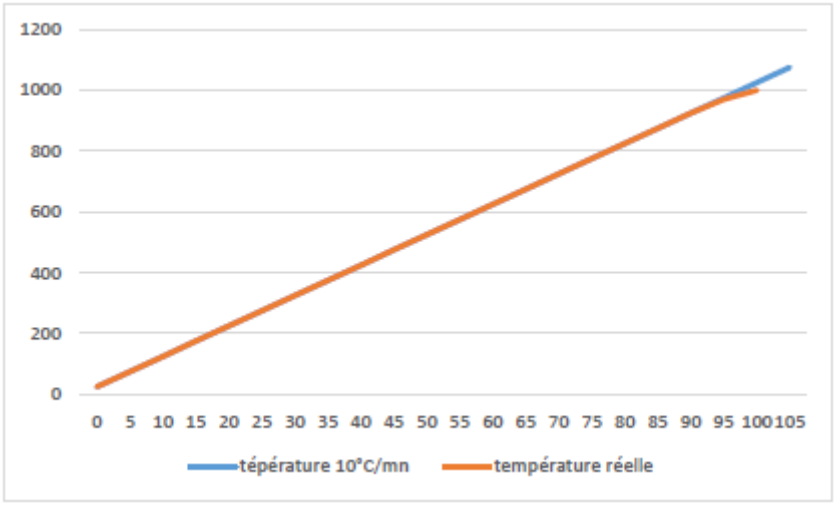


Figure 39. Graphique de performance du four réparer à 10°C/mn

➢ Interprétation :

Cette courbe indique que notre appareil arrive bien à suivre les consignes jusqu'à925°C

et arrive à atteindre 1000°C avec quinze minutes de retard. Ce décalage est dû à la faible puissance de la résistance.

Pour résoudre au problème des résistances nous avons tenté de rechercher des résistances mais malgré cela nous n'avons pas pu trouver.

V.4.Essai de conception un four à ETRC :

V.4.1.Mode opératoire :

Dans notre volet pratique qui a été au sein de l'entreprise publique des travaux routiers centre EPTRC, nous avons effectué un essai de préparation de la matière première (le sable, le plâtre) et conception d' four à partir de 1/3 de sable fin, 2/3 plâtre, et d'eau au sein de l'laboratoire de l'entreprise publique des travaux routiers centre EPTRC.

V.4.2.Préparation de notre échantillon :

Nous avons réalisé l'échantillon en suivant le procédé ci-dessous :

-peser la masse de la matière première le sable fin +pesez plâtre au balance électronique de laboratoire de l'entreprise publique des travaux routiers centre EPTRC.

-tamis de la matière premier, le tamisage s'effectuer manuellement par un tamis traditionnel qui a une ouverture de 1,6mm.

-malaxer le sable 1/3 de sable fin, 2/3 plâtre, et d'eau.

-l'échantillon ont été coulé sous forme rectangulaire de dimension 19*11*5cm, il a été reposé pendant 1h avant le mettre dans le four.



Figure 40. Le moule de notre échantillon

- Le processus de déformation à chaud, Il a été chauffé dans le four à une temperature900°C de pendant 2h,le cuisson de notre échantillon s'effectuer au sein de laboratoire de l'entreprise publique des travaux routiers centre EPTRC.

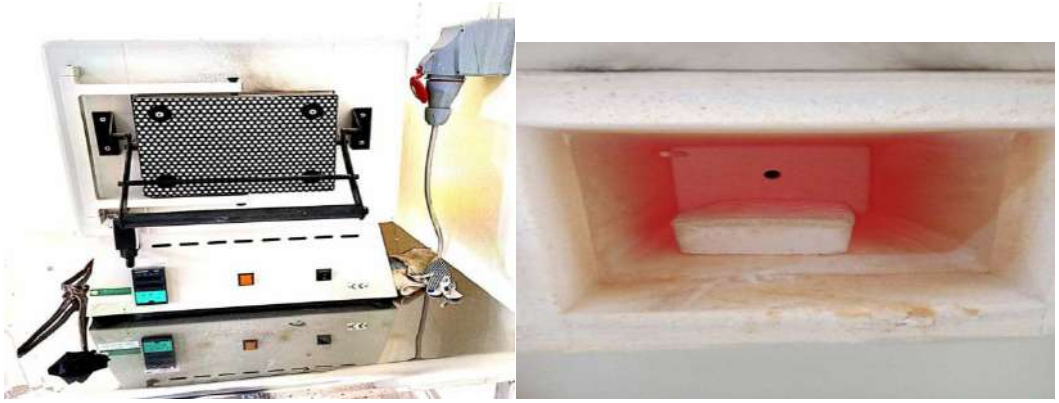


Figure 41.four de cuissant EPTRC

➢ Resultat et interpretation :

Le processus de déformation à chaud,Notre echantion,il a subit a des point de fisssure dans la surface et ou profondeur et fragmentation avecle temps et par chocs et à l'usure par frotement et vibration,plus l'echantllion est froid , plus la fissuration est augmente .

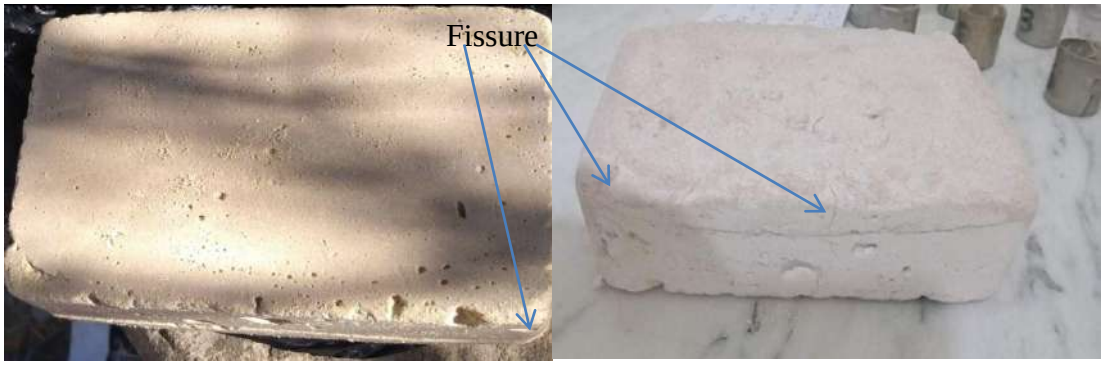


Figure 42.l'échantillon final

Conclusion Générale :

L'objectif principal de ce travail est une étude générale sur les fours et les types qui existent. Par la suite la réalisation d'un four électrique de laboratoire atteignant une température de 1000°C, qui dispose des multitudes de fonctions en offrant ainsi à son utilisateur une facilité de travail grâce à son interface électronique.

La réalisation de cet appareil permet de résoudre une partie de l'insuffisance d'appareillage dans notre laboratoire.

Les résultats et les interprétations de notre partie de conception d'un four électrique de laboratoire passent par des étapes :

La première étape concerne le choix et la caractérisation du four qui convient notre laboratoire ainsi que la réalisation de deux couches de réfractaire dont la première à base de mullite a été obtenue par la cuisson à 1100°C de kaolin et vingt pourcent de silice; tandis que la deuxième couche réfractaire silico-argileux jouant le rôle d'isolant thermique a été obtenue par la cuisson à 1100°C de kaolin à vingt-cinq virgule huit pourcent, de la silice à soixante virgule deux pourcent et de la sciure de bois de quatorze pourcent.

La deuxième partie concerne le choix des matières premières qui sont : le kaolin, la silice et la sciure de bois.

A la fin de notre travail, on a pu conclure que le choix de la matière première (sable fin, plâtre), le choix du four, la méthode de préparation et la température de cuisson joue un rôle très important dans la préparation des matériaux de four. Cette remarque on l'a retiré pendant la préparation de notre échantillon au sein de EPTRC, dont on a obtenu des fragmentations par des fissures au surface et avec le temps, ces fissure ont atteins la profondeur de l'échantillon car leur fragmentation ont augmenté avec le temps et la température.

Bibliographie :