

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Mémoire de Fin d'Etudes
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
génie des matériaux

Conception et réalisation d'un four rotatif pour
l'élaboration du silicium métallurgique par la
réduction directe de SiO_2 .

Noussiba Noura HAIMOUD, Sarra LAID

Sous la direction de M. A.KASSER (Docteur)

Présenté et soutenu publiquement le (18/06/2018)

Composition du jury :

Président	M. M.DJEGHLAL	Professeur	ENP
Promoteur	M. A.KASSER	Docteur	ENP
Examineur	M. M.LARIBI	Professeur	ENP
Examineur	M. K.ABADLI	Docteur	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Mémoire de Fin d'Etudes
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
génie des matériaux

Conception et réalisation d'un four rotatif pour
l'élaboration du silicium métallurgique par la
réduction directe de SiO_2 .

Noussiba Noura HAIMOUD, Sarra LAID

Sous la direction de M. A.KASSER (Docteur)

Présenté et soutenu publiquement le (18/06/2018)

Composition du jury :

Président	M. M.DJEGHLAL	Professeur	ENP
Promoteur	M. A.KASSER	Docteur	ENP
Examineur	M. M.LARIBI	Professeur	ENP
Examineur	M. K.ABADLI	Docteur	ENP

الملخص:

مشروعنا المسمى "تصميم وبناء فرن دوّار لتصنيع السيليكون المعدني من خلال الارجاع المباشر لـ SiO_2 " يدخل بشكل رئيسي تحت إطار الهندسة. أولاً، بدأنا بمحاكاة وتصميم جهاز دوران الفرن ومختلف القطع المكونة له في برنامج خاص بالرسم، ثم بعد ذلك انتقلنا إلى الخطوة الأكثر أهمية بالنسبة للمهندس، بحيث يختار المواد الأساسية المستخدمة في التصميم مع مراعاة الخصائص المطلوبة. أخيراً، قمنا بتجميع وتركيب الأجزاء المختلفة التي تم تصميمها لتتصل على نظام الدوران الخاص بالفرن المطلوب. من أجل تحقيق هذا النظام استطعنا تعلم واتقان مختلف التقنيات والطرق اللازمة للإنشاء، كما استطعنا سردها لتكون نموذجاً لكل مهندس يريد صناعة شيء مماثل.

الكلمات المفتاحية: فرن دوّار ، سليكون ، ارجاع مباشر.

Abstract

Our final project entitled « design and realization of a rotative furnace for the production of a metallurgical silicon by direct reduction of SiO_2 ». This project explains the link between material and mechanical engineering processes. First of all, we have started by the simulating and designing the rotary system of the furnace and the different mechanical parts using a designing software. Then, we moved to the most important part for an engineer, which is the selection of the materials to be used by taking into account the required properties. Finally, we assembled the various parts made in order to achieve our desired rotating system. In order to get this system, we were able to learn the various techniques and methods of machining and mounting different compounds leading to the desired device.

Key words : furnace, rotative, silicon, direct reduction.

Résumé

Notre projet intitulé « conception et réalisation d'un four rotatif pour l'élaboration du silicium métallurgique par la réduction directe de SiO_2 », représente une grande partie d'ingénierie. Nous avons commencé tout d'abord par simuler et concevoir le dispositif de rotation du four et les différentes pièces constitutives en utilisant un logiciel. Ensuite, nous sommes passés à l'étape la plus importante pour un ingénieur qui est le choix des matériaux utilisés dans la conception en tenant compte des propriétés exigées. Enfin, nous avons monté et assemblé les différentes pièces réalisées pour aboutir à notre système de rotation voulu. Cette réalisation est faite afin d'éviter le problème du frittage de la poudre lors de sa réduction.

Mots clés : four, rotatif, silicium, réduction directe.

Dédicace

Nous dédions ce travail à :

Nos chers parents pour leurs sacrifices, leurs
amours, leurs tendresses, leurs soutiens et
leurs prières tout au long de nos vies ;

Nos chers frères et sœurs ;

Charaf, Ferial, Insaf et safaa ;

Ceux qui nous ont soutenus et qui nous ont
supportés durant cette année ;

Nos familles ;

Nos amis ;

Les personnes qui nous ont aidé, encouragé
et qui nous ont accompagné durant nos
chemins de vie.

Remerciement

En premiers lieu nous remercions dieu tout puissant qui nous a donné le courage, la force et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier tout d'abord notre encadreur : Dr. A.KASSER, pour sa patience, son aide, sa confiance, ses remarques et ses conseils et sa gentillesse qui mérite toute l'admiration.

Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail :

- Pr. M.DJEGHLAL pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury de cette soutenance.
- Pr. M.LARIBI et Dr. K.ABADLI pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et pour avoir accepté de l'examiner et faire partie de ce jury.

Nous tenons aussi à remercier tous les enseignants qui nous ont aidés et qui ont contribué à notre formation durant toute la période de nos études.

Nous adressons également nos remerciements aux ingénieurs et responsables du laboratoire de génie des matériaux et ceux de l'atelier du génie mécanique de l'école nationale polytechnique pour leurs aides et disponibilité tout au long de la réalisation de notre PFE.

Nous tenons également à remercier tous nos camarades pour la bonne humeur et les bons moments passés ensemble.

Enfin, nous remercions nos familles de leurs soutiens.

Sommaire :

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale12

Partie bibliographique

Chapitre I : Les fours industriels

I.	Introduction	15
II.	Fours industriels	15
III.	Fours rotatifs.....	15
IV.	Classification des fours	
	IV.1. Classification des fours par continuité	16
	IV.2. Classification des fours par source de chaleur	16
	IV.3. Classification des fours par combustible	17
	IV.4. Classification des fours par chauffage direct ou indirect	17
	IV.5. Classification par utilisation du four	18
	IV.6. Classification des fours par type de récupération de chaleur	18
V.	Usage des fours.....	19
VI.	Conclusion.....	21

Chapitre II : Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

I.	Introduction.....	23
II.	Exigence de performance de la structure de base du four.....	23
III.	Méthode de construction de base.....	24
IV.	L'alignement de brique.....	25
V.	Alignement monolithique.....	27
VI.	Installation traditionnelle de réfractaire moulable.....	27
VII.	Tailles et formes des réfractaires	29
VIII.	La structure métallique du four	29
IX.	Construction du toit du four	31
X.	Matériaux réfractaires en céramique.....	31
	X.1. Classification des réfractaires	31
	X.2. Propriétés physiques des réfractaires	38
	X.3. Propriétés fonctionnelles des réfractaires	39
XI.	Réfractaires isolants	42
XII.	Alliage à haute température.....	42
	XII.1. Aciers au carbone	42
	XII.2. Aciers alliés	42
	XII.3. Les alliages à haute teneur en nickel.....	44
XIII.	Conclusion.....	45

Chapitre III : La chaleur dans les fours

I.	Introduction	47
II.	Transfert de chaleur.....	47

II.1. Conduction	47
II.2. Convection.....	48
II.3. Rayonnement	50
III. Chauffage des fours.....	50
III .1. Chauffage électrique	50
III .2. Chauffage par combustible	51
IV. Conclusion	53

Chapitre IV : le mouvement de la charge et le rendement du four

I. Introduction	55
II. Les différents types de comportement de la charge.....	55
II.1. Le glissement	56
II.2. Le régime d’avalanche	56
II.3. Le roulement	56
II.4. Cascade, cataracte, centrifugation	57
III. Trajectoire d’un grain au sein de la charge	57
IV. Rendement du four	57
IV.1. Calcul du rendement.....	58
IV.2. Les pertes dans les fours	58
IV.3. Efficacité du four	58
IV.4. Facteurs influant sur la performance du four	59
V. Conclusion	59

Partie expérimentale

Chapitre V : Design et choix des matériaux

I. Introduction	62
II. Design du système et matériaux utilisés	62
III. Le choix du matériau.....	68
IV. Conclusion	72

Chapitre VI : La réalisation

I. Introduction	74
II. Fabrication d’un dispositif qui maintien le four	74
III. Fabrication du support pivotable	80
IV. Fabrication du système de transmission de mouvement.....	84
V. Conclusion	92

Chapitre VII : Résultats et discussions

I. Introduction	94
II. Fraction remuée	94
III. Coefficient de frottement.....	96
IV. Soudage	97

IV.1. Procédé TIG	97
IV.2. Procédé SMAW	97
V. Réducteur de vitesse	98
VI. Engineering	99
VII. Conclusion	99
Conclusion générale	101
Proposition des travaux complémentaires.....	102
Références bibliographiques	104

Liste des figures

Fig.I.1: Four à cloche mobile.....	18
Fig.II.1 : Construction typique de revêtement de brique montrant des couches alternées de brique et des joints de dilatation.....	24
Fig.II.2 : Un alignement monolithique typique maintenu à la coquille par des ancrages.....	24
Fig.II.3 : Un alignement en fibres de céramique.....	25
Fig.II.4 : Une défaillance de la brique causée par le manque d'espace pour l'expansion.	26
Fig.II.5 : brique conique étant installé dans le four rotatif.....	26
Fig.II.6 : les ancrages typiques pour l'installation des réfractaires moulables.....	28
Fig.II.7 : montage typique pour couler un revêtement réfractaire sur l'extérieur d'un tuyau de bruleur.....	28
Fig.II.8 : quelques formes et tailles typiques des briques réfractaires.....	29
Fig.II.9 : défaillance d'un tube de bruleur en acier inoxydable A316.....	30
Fig.II.10: Construction typique d'un toit en arc.....	31
Fig.II.11: détermination de la réfractarité.....	40
Fig.II.12: détermination de la stabilité à laitier par la méthode à creuset.....	41
Fig.III.1: Effet de la conductivité et le temps sur la température pour deux solides de températures et conductivité différentes.....	48
Fig.IV.1 Les différents mouvements transversaux de charge.....	55
Fig. V.1: design du système rotatif du four.....	62
Fig. V.2: les deux parties constituant le système de rotation du four.....	62
Fig. V.3: les différents éléments constituant la partie A.....	63
Fig. V.4: partie B du système rotatif du four.....	63
Fig. V.5: les deux ensembles constituant la partie B.....	64
Fig. V.6 : partie B' du système rotatif.....	64
Fig. V.7 : les différents éléments de la partie B'.....	65
Fig. V.8: les composants des galets.....	65
Fig. V.9 : design de la partie B" du système rotatif.....	66
Fig. V.10: les différents constituants de la partie B".....	66
Fig. V.11: la partie C du système rotatif	67

Fig. V.12: les différents constituants de la partie inférieure du C.....	67
Fig. V.13 : structure prismatique porteuse du réducteur et du moteur.....	72
Fig.VI.1: un cerceau en tube de cuivre, cintré et brasé.....	74
Fig.VI.2 : (a) moule en bois - (b) pièce en résine.....	74
Fig.VI.3 : (a)découpage, (b) assemblage, (c) soudage des cornières.....	75
Fig.VI.4 : augmentation de l'épaisseur des cornières par des petites pièces carrées en aluminium.....	75
Fig. VI.5: perçage et taraudage des centres des cadres.....	75
Fig. VI.6: découpage et limage des coins des cadres.....	76
Fig. VI.7: perçage et taraudage des cerceaux.....	76
Fig. VI.8 : perçage des pièces en résine.....	76
Fig. VI.9: fixation des pièces en résine sur le cerceau.....	77
Fig. VI.10: montage des cadres sur les cerceaux.....	77
Fig.VI.11: fixation des cadres en aluminium sur les pièces en résine.....	77
Fig.VI.12: fixation du four sur le dispositif fabriqué.....	78
Fig.VI.13 : ajustement du dispositif avec le four.....	78
Fig.VI.14: changement de la sortie du câble du four.....	79
Fig.VI.15: maintien de la distance entre les cerceaux.....	79
Fig.VI.16: maintien des entretoises.....	79
Fig.VI.17: fabrication du support pivotable.....	80
Fig.VI.18: usinage et tournage des pièces en acier.....	80
Fig.VI.19 : coulage de la résine pour la fabrication des galets.....	81
Fig.VI.20: galet usinés.....	81
Fig.VI.21: fabrication des supports des galets.....	82
Fig.VI.22: l'assemblage et le soudage des petits profilés.....	82
Fig.VI.23: perçage des supports des galets.....	82
Fig.VI.24: arbre de fixation des galets.....	82
Fig.VI.25: fixation des galets dans leurs supports par les arbres usinés et circlips.....	83
Fig.VI.26 : le perçage du cadre pivotable porteur du four.....	83
Fig.VI.27: emplacement des galets sur le cadre pivotable.....	83
Fig.VI.28: fabrication du support porteur du moteur et réducteur.....	84

Fig.VI.29: découpage des cornières.....	84
Fig.VI.30: assemblage et soudage des cornières sur le cadre.....	84
Fig.VI.31 : fixation d'une plaque en bois sur la structure.....	85
Fig.VI.32 : découpage et pliage du fer plat.....	85
Fig.VI.33: perçage du fer plat.....	85
Fig.VI.34: croisillons du joint de cardon.....	85
Fig.VI.35: les bagues du joint de cardon.....	86
Fig.VI.36: montage des croisillons sur les fers plats.....	86
Fig.VI.37: l'usinage d'une pièce pour le maintien des fers plats.....	86
Fig.VI.38: soudage de la pièce avec le joint de cardon.....	87
Fig.VI.39: pliage du fer plat.....	87
Fig.VI.40: fixation des fers plats avec la pièce.....	87
Fig.VI.41: fixation du l'assemblage sur le four.....	88
Fig.VI.42: l'axe de transmission de mouvement.....	88
Fig.VI.43: fixation de l'axe dans le réducteur et joint de cardon.....	89
Fig.VI.44: fixation du réducteur sur la structure porteuse.....	89
Fig.VI.45 : un accouplement.....	89
Fig.VI.46: usinage de l'accouplement.....	90
Fig.VI.47: axe liant le réducteur à l'accouplement.....	90
Fig.VI.48: axe liant l'accouplement au moteur.....	90
Fig.VI.49: fixation du moteur sur la structure porteuse.....	91
Fig.VI.50: montage des axes et de l'accouplement.....	91
Fig.VI.51: système de rotation d'un four rotatif pour la réduction directe d'un minerai.....	92
Fig. VII.1 : évolution de la fraction remuée en fonction de l'angle d'inclinaison pour une masse de 25 g.....	94
Fig. VII.2 : évolution de la fraction remuée en fonction de l'angle d'inclinaison pour une masse de 50 g.....	94
Fig. VII.3 : évolution de la fraction remuée en fonction de l'angle d'inclinaison pour une masse de 75 g.....	95
Fig. VII.4 : évolution de la vitesse à la sortie du réducteur en fonction de la vitesse du moteur.....	98

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Usage du four en fonction du domaine de température.....	20
Tableau II.1 : caractéristiques de la résistance mécanique des réfractaires.....	41
Tableau II.2 : la composition et les caractéristiques des cinq groupes familiaux des aciers inoxydables.....	44
Tableau V.1 : composition chimique du fer plat du joint de cardon.....	68
Tableau V.2 : composition chimique du croisillon du joint de cardon.....	68
Tableau V.3 : composition chimique des axes de transmission de mouvement.....	69
Tableau V.4 : composition chimique des pièces cylindrique des centres des galets.....	69
Tableau V.5 : composition chimique des axes de fixation des galets sur leurs supports.....	70
Tableau V.6 : composition chimique des supports des galets.....	70
Tableau V.7 : composition chimique du support pivotable du four.....	70
Tableau V.8 : composition chimique des entretoises d'ajustement de distance.....	71
Tableau V.9 : composition chimique des cornières de maintien de la distance entre les cerceaux.....	71
Tableau V.10 : composition chimique des deux cadres d'aluminium.....	71
Tableau V.11 : composition chimique des carreaux pour le renfort.....	71
Tableau V.12 : composition chimique de la cornière d'acier "a".....	72
Tableau V.13: composition chimique du profilé d'acier "b".....	72
Tableau VII.1: les coefficients de frottement entre différents matériaux.....	96

Introduction générale

Un four est une enceinte maçonnée ou un appareil, muni d'un système de chauffage puissant, qui transforme, par la chaleur, les produits et les objets.

Un four tubulaire rotatif, comme celui utilisé pour la fabrication du clincker dans une cimenterie, est mis en position légèrement inclinée, puis chauffé jusqu'à la température de consigne. Le matériau est ensuite approvisionné en continu à l'extrémité supérieure du tube. Il passe tout au long du tube chauffé pour ressortir par l'extrémité inférieure. Le temps du traitement thermique dépend de l'angle d'inclinaison, de la vitesse de rotation, de la longueur du tube, ainsi que des propriétés d'écoulement du matériau.

Dans le cadre d'un projet de doctorat qui est intitulé « élaboration du silicium métallurgique pour la fabrication des cellules photovoltaïques par la réduction directe de la silice SiO_2 » nous avons pris la partie qui concerne la conception et la réalisation d'un système de rotation d'un four à réduction directe afin d'avoir une charge dynamique lors de la réduction de SiO_2 , et éviter le problème de frittage de la charge.

Dans ce qui suit nous trouverons deux grandes parties : la partie bibliographique et la partie expérimentale.

La partie bibliographique définit les fours industriels et rotatifs en précisant les différents critères de classification. Ici il tenu compte des méthodes de construction de base, l'ensemble des matériaux utilisés dans la fabrication d'un four ainsi que les types et les différentes propriétés des réfractaires. Aussi, le mouvement de la charge à l'intérieur de l'enceinte, le transfert de chaleur entre les différents éléments et le rendement sont des critères importants dans la construction d'un four.

La partie réalisation contient la conception du four et la présentation des différents matériaux utilisés après avoir étudié les différentes exigences à respecter dans chaque partie de ce four. En fin, les différentes techniques de réalisation du système de rotation d'un four sont expliquées, pour qu'à la fin on aboutisse au montage des différents composants entrant dans la construction du système de rotation préconisé et améliorer la performance du four.

Partie bibliographique

Chapitre I

Les fours industriels

I. Introduction

Depuis la découverte du premier four traditionnel, de génération à génération ce four n'a pas cessé d'évoluer dans la vie quotidienne de l'humanité, les améliorations continues apportées ont permis au four d'occuper une place importante dans le quotidien, les apports technologiques conjugués aux efforts de la recherche ont permis au four d'occuper une place dominante dans tous les secteurs.

Le développement du four dans le secteur industriel a engendré un essor important dans plusieurs segments de la production, par amélioration des procédés de fabrication, et a permis d'obtenir des produits et matières premières plus raffinés avec des qualités optimales.

II. Fours industriels

"L'Oxford English Dictionary" définit un four comme «une structure fermée pour le chauffage intense par le feu. Un four est décrit comme un four à brûler, à cuire ou à sécher [1].

Les fours industriels sont des enceintes isolantes conçues pour fournir de la chaleur aux charges pour de nombreuses formes de traitement thermique [2].

On parle généralement de fours pour les traitements de métaux et de matériaux à une température supérieure à 300°C environ ; le terme d'étuve est réservé aux traitements des produits organiques et minéraux à une température inférieure à 300°C, et en particulier, aux traitements par la vapeur d'eau. On peut trouver d'autres termes tels que: enceinte, chaîne, cuve, bain et réacteur. [3].

Les fours industriels dans lesquels la température est en dessous de 650°C, sont communément appelés «ovens» en Amérique du Nord. En Europe, de nombreux "fours" sont appelés "ovens". Dans l'industrie de la céramique, les fours sont appelés "kilns". Dans la pétrochimie et CPI (les industries des procédés chimiques), les fours peuvent être appelés «heaters», «kilns», «afterburners», «incinerators» ou «destructors» [2].

III. Fours rotatifs

Il est composé d'un cylindre isolé, horizontal (ou légèrement incliné), mobile autour d'un axe de rotation avec des ouvertures au sommet et à la base du cylindre pour le chargement et la coulée [3].

Les fours rotatifs sont utilisés pour diverses opérations de traitement du minerai. La taille des fours varie de 2 à 6 m de diamètre et peut être de 50 à 225 m de long avec une masse de fonctionnement allant jusqu'à 3000 tonnes [4].

Les fours rotatifs ont été synonymes de fours à ciment et à chaux probablement à cause de l'histoire de leur évolution et de leur développement. Il a été rapporté que des gisements de ciment caractérisés par des géologues israéliens dans les années 1960 et 1970 placent la fabrication du ciment à des années avant JC lorsque des réactions entre le calcaire et le schiste bitumineux se sont produites lors de la combustion spontanée pour former un dépôt naturel de composés de ciment (Blezard, 1998). Entre 3000 et 300 ans avant JC, l'évolution du ciment avait continué avec les Egyptiens qui utilisaient de la boue mélangée à la paille pour lier les briques séchées pour réaliser des projets massifs

tels que les pyramides. Cette évolution s'est poursuivie avec les Chinois qui utilisaient des matériaux cimentaires pour la construction de la Grande Muraille [5].

Les fours rotatifs ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années dans les processus industriels et ont continuellement été amélioré au cours du siècle. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles que les calcinations de calcaire, cimenterie, métallurgie et incinération des déchets. Dans la technique de pyro-traitement, les matériaux sont soumis à des températures élevées (généralement supérieures à 800°C), d'où un changement chimique ou physique pourrait survenir. De plus, il peut être utilisé pour de nombreux processus industriels tels que l'incinération, le mélange, le grillage, le frittage, la fusion, la gazéification, la déshydratation et les réactions gaz-solide. Les fours rotatifs sont capables de fonctionner à haute température, par exemple ; brûlage à la chaux (1200°C), combustion de clinker de ciment (2000°C), calcination de coke de pétrole (1100°C) et calcinations d'oxyde d'aluminium (1300°C) [6,7].

IV. Classification des fours

IV.1. Classification des fours par continuité

Dans ce cas, la manutention et la circulation du produit sont les critères dominants dont on peut classer les fours en :

- Four continu : le produit à chauffer entre à une des extrémités et en ressort à l'autre. C'est le cas :
 - des fours de réchauffage de semi-produits de la sidérurgie ;
 - des fours de l'industrie chimique et du raffinage ;
 - des fours rotatifs de l'industrie cimentière.
- Four discontinu : le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit. C'est le cas :
 - des fours à sole mobile de forge ;
 - des fours à soles fixes de traitement thermique ;
 - des fours à cloches mobiles et élévateurs.

Cette différence dans la manutention entraîne des différences notables du point de vue thermique.

Dans un four continu, un point du four sera toujours à la même température alors que dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit [3].

IV.2. Classification des fours par source de chaleur

La chaleur est générée dans les fours pour élever leur température à un niveau légèrement supérieur à la température requise pour le processus, soit par :

- La combustion du carburant : les fours à combustible (à combustion) sont les plus utilisés ;

- La conversion de l'énergie électrique en chaleur : les fours chauffés électriquement sont utilisés là où ils offrent des avantages qui ne peuvent pas toujours être mesurés en termes de coût du carburant.

Dans les fours à combustion, la nature du combustible peut faire la différence dans la conception du four [2].

IV.3. Classification des fours par combustible

Le type d'énergie disponible et utilisé a un impact important sur la conception, l'utilisation et l'exploitation des fours. On peut classer les fours en fonction de l'énergie utilisée, comme suit :

- les fours électriques : il s'agit des fours à résistances (effet Joule), à arcs, à induction et à électrodes submergées ;
- les fours à gaz : ils utilisent le gaz naturel, mais aussi le gaz de cokerie, le gaz de raffinerie et le gaz de haut-fourneau ;
- les fours à combustibles liquides : ils utilisent le fuel lourd, le gazole et le naphta ;
- les fours à combustibles solides : ils utilisent les charbons ou le coke de pétrole (généralement sous forme pulvérisée) et les divers déchets.

Les fours électriques industriels peuvent utiliser le chauffage par résistance ou par induction. Théoriquement, s'il n'y a pas d'échappement de gaz ou d'air, le chauffage électrique n'a pas de cheminée pour la perte de gaz.

Le chauffage par résistance implique généralement les coûts d'électricité les plus élevés et peut en cas de nécessité utiliser des ventilateurs.

Dans le chauffage par induction, un courant traverse une bobine qui entoure la pièce à chauffer. La fréquence du courant électrique à utiliser dépend de la masse de la pièce à chauffer. La bobine d'induction doit être refroidie à l'eau pour les protéger du surchauffage. Bien que le chauffage à induction utilise généralement moins d'électricité que le chauffage par résistance, une partie de ce gain peut être perdu en raison du coût de l'eau de refroidissement [2].

IV.4. Classification des fours par chauffage direct ou indirect

On peut classer les fours selon le mode de chauffage en deux types, le critère est ici le contact entre la charge et les gaz issus de la combustion (Fig. I.1).

- Fours à chauffage direct

Il y a contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. Du point de vue thermique, cela entraîne qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection. Cette dernière provoque des phénomènes à la surface du produit qui peut lui porter préjudices.

Pour éviter ce contact, on place parfois, entre la charge et les gaz un écran protecteur, le chauffage est alors indirect.

- Fours à chauffage indirect

L'interaction entre les gaz de combustion et la charge n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge. Le problème technologique est alors la tenue de cette paroi qui est portée à haute température et est au contact de la flamme et/ou des gaz à haute température. C'est le cas des fours à cloche mobile, des fours à moufle et des fours équipés de brûleurs à tubes radiants [2,3].

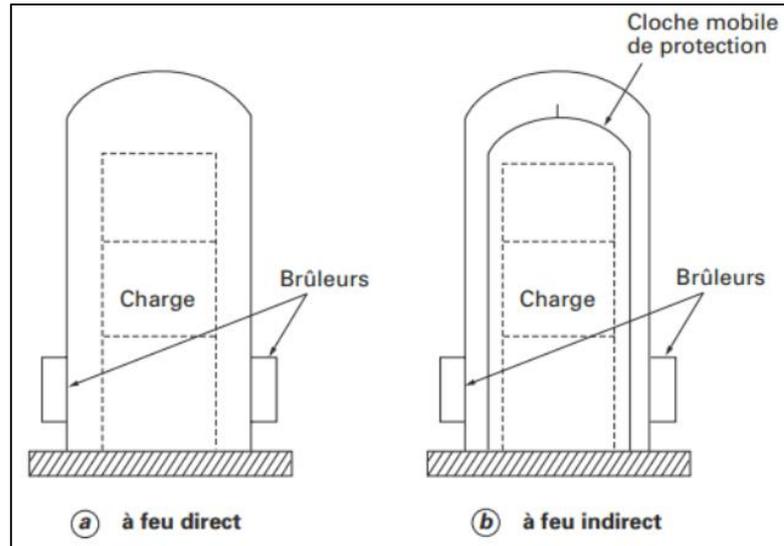


Fig. I.1: Four à cloche mobile [3].

IV.5. Classification par utilisation du four

On peut classer les fours selon le mode d'utilisation en :

- Des creusets de trempe ou des fours de chauffage au lingot, pour chauffer ou réchauffer de gros lingots, blooms, ou brames, généralement en position verticale ;
- Des fours de forgeage pour le chauffage des pièces entières ou pour chauffer les extrémités des barres pour forgeage ou soudage ;
- Des fours à fente ont une fente horizontale au lieu d'une porte pour insérer des nombreuses barres qui vont être chauffé en même temps. La fente peut jouer aussi le rôle d'une cheminée ;
- des fours portant le nom du matériau chauffé comprennent les fours à tête boulonnée, fours à fil, fours à rivets et fours à plaques.

Certains fours aussi sont classés par le processus dont ils font partie, tels que le durcissement, la trempe, le recuit, la fusion et la polymérisation [2].

IV.6. Classification des fours par type de récupération de chaleur

La plupart des efforts de récupération de chaleur visent à utiliser la "chaleur résiduelle" qui sort des cheminées. Certaines formes de récupération de la chaleur sont le préchauffage de l'air, le préchauffage du combustible, le préchauffage de la charge, les chaudières à récupération et régénération de la chaleur perdue.

Le préchauffage de l'air de combustion est réalisé par des récupérateurs ou des régénérateurs. Les récupérateurs sont des échangeurs de chaleur en régime permanent qui transmettent la chaleur des gaz de combustion chauds à l'air de combustion froid.

Les régénérateurs sont des dispositifs non stables qui stockent temporairement la chaleur du gaz de combustion dans de nombreuses petites masses réfractaires ou de métal.

Dans le passé, les fours régénératifs étaient de très grandes structures réfractaires intégrées incorporant à la fois un four et un régénérateur réfractaire, ce dernier souvent beaucoup plus grand que la partie du four. À l'exception des grands réservoirs de verre, la régénération est maintenant accomplie avec les paquets intégrateur de régénérateur / brûleur qui sont utilisés par paires.

Le préchauffage de la charge et le préchauffage de l'air de combustion sont utilisés ensemble dans le générateur de vapeur, les fours de chauffage du métal et les fours à tunnel pour le frittage des céramiques [2].

V. Usage des fours

Les fours sont utilisés dans des secteurs différents :

1- Industrie des métaux

Pour ce secteur d'activité, les fours sont présents dans :

- La sidérurgie et la transformation de l'acier ;
- La métallurgie et la transformation des métaux non ferreux ;
- La fonderie et le travail des métaux ;
- Les constructions mécaniques, automobiles, navales et aéronautiques.

Chaque four a un ou plusieurs usages particuliers qui correspondent à un domaine de température [3].

Tableau I.1. Usage du four en fonction du domaine de température [3].

Domaine de température	Usages
De 50 à 200°C	- séchage de pièces après lavage/dégraissage ; - dé-solvation et cuisson de peinture ; - fusion de cuire (fonderie).
De 150 à 300°C	- stabilisation des aciers ; - revenu des aciers à haute teneur en carbone ; - revenu et vieillissement des alliages légers ; - bleuissement des aciers.
De 500 à 700-750°C	-revenu des aciers ordinaires ; -recuit des aciers ; -recuit des soudures ; -recuit des métaux cuivreux ; -stabilisation de la fonte ; -fusion des alliages légers.
De 700 à 850-900°C	-cémentation au carbone, carbonituration ; -recuit des aciers ; -trempe des aciers ; -recuit des maillechorts et des cupronickels.
De 900 à 1000-1100°C	-cémentation au carbone ; -recuit des aciers spéciaux ; -trempe des aciers spéciaux ; -traitement des aciers inoxydables et des aciers réfractaires ; -traitement des fontes malléables (à cœur blanc et à cœur noir).
De 1000 à 1250-1300-1350°C	-traitement des aciers rapides ; -fusion du cuivre.
Au-delà de 1350°C	-fusion de la fonte et de l'acier.

2- Agriculture et industries agroalimentaires

Les fours de ces secteurs industriels ont pour finalité :

- le séchage dans un domaine de température d'enceinte de 40 à 180°C ;
- la cuisson (100 à 300°C) ;
- la pasteurisation (70 à 80°C) ;
- la stérilisation (110 à 130°C) ;
- la rétraction des emballages plastiques [3].

3- Matériaux et céramique

Pour ce domaine, les fours permettent :

- Le séchage de matériaux broyés : craie, talc et chaux (50 à 120°C) ;
- Le séchage des matériaux façonnés préparés par voie humide : argile et poteries ;
- La fusion de verre, de vitrocéramique, d'émaux, de réfractaires et de fibres céramiques ;
- La cuisson de produits obtenus par moulage ou frittage :
 - les produits céramiques techniques (1 000 à 2 600°C) ;
 - les briques, les tuiles en terre (1 000°C) ;
 - les réfractaires de fours (1 200 à 1 700°C) ;
 - les abrasifs de meules (1 200°C) ;
 - les faïences (920 à 1 250°C), la porcelaine (1 100 à 1 600°C) ;
 - les poteries et les grès (950 à 1 280°C).
- la thermo-maturation du béton préfabriqué (50 à 80°C) ;
- la fabrication du ciment (clinkérisation à 1 450°C) [3].

4- Autres secteurs

Les fours sont également rencontrés pour[3]:

- Le séchage du bois (40 à 100°C) ;
- Le séchage de produits pharmaceutiques (20 à 80°C) ;
- La polymérisation de matières plastiques (100 à 200°C) ;
- La vulcanisation du caoutchouc (150 à 200°C).

VI. Conclusion

Les différentes variétés de fours ont été à l'origine de la mise en place des assises de base de l'industrie modernes, l'intégration au fur et à mesure des technologies de pointe a permis à l'homme d'ouvrir de nouveaux horizons de recherches.

Le développement des techniques de régulations des températures des fours, ont été d'un grand apport aux chercheurs pour mieux contrôler les températures aux différents stades de productions, ce qui leur a permis d'optimiser la qualité et ainsi obtenir des produits et matières plus raffinés.

Chapitre II

Choix des matériaux
pour la réalisation
d'un four

I. Introduction

La conception de la structure du four et le choix des matériaux de construction restent un sujet complexe. L'objectif principal d'un four est d'atteindre un chauffage contrôlé de la charge à une température plus élevée et une consommation de carburant inférieure à celle qui pourrait être atteinte à l'air libre. Les premiers fours fabriquaient ont des structures de brique et de pierre. Comme la production des fours a augmenté et les fours sont devenus de format plus grand, les structures de brique et de pierre sont devenues fragiles, des bandes de renfort en acier ont souvent été ajoutées à l'extérieur pour renforcer la structure. Ensuite, le renforcement en acier est devenu une partie de la conception initiale, mais la structure de base en briques est restée.

Un certain nombre de facteurs doivent être pris en compte dans le choix des matériaux appropriés pour améliorer l'efficacité énergétique de l'équipement tout en prolongeant leur durée de vie avec un coût minimum. Ces facteurs comprennent les caractéristiques mécaniques, la résistance à l'oxydation ou à la corrosion à chaud, l'utilisation de composants moulés ou fabriqués suivant la disponibilité des matériaux.

II. Exigences de performance de la structure de base du four

Dans sa forme la plus simple, un four est constitué d'une enveloppe avec une source de chaleur, généralement une flamme, pour fournir l'énergie à l'installation. Le chauffage peut être direct en utilisant le rayonnement de la flamme et / ou le transfert de chaleur par convection provenant des produits de combustion ou indirecte par la chaleur radiante d'une paroi chauffée. Quelle que soit la méthode de chauffage choisie, la structure du four doit concevoir pour effectuer les fonctions suivantes :

- Fournir un environnement contrôlé pour le processus ;
- Fournir un espace optimal pour le processus de combustion et pour un transfert de chaleur efficace ;
- Réduire au minimum les fuites d'air et de gaz ;
- Minimiser les pertes de rayonnement et de convection ;
- Avoir une longue durée de vie et être facile à entretenir.

Les fours doivent s'accommoder à une large gamme de température, de la température ambiante jusqu'à la température de 2000°C, c'est un grand défi aux ingénieurs de conception et de maintenance. Les aspects critiques qui doivent être pris en compte sont :

- Adaptation de la dilatation thermique différentielle ;
- Accueillir l'expansion irréversible causée par les changements structuraux dans le réfractaire pendant le chauffage initial ;
- Minimiser la corrosion à haute température.

La solution de tous ces problèmes reste une responsabilité du concepteur car elle nécessite un examen approfondi de tous les aspects, y compris le choix de matériaux tels que les céramiques réfractaires appropriés.

III. Méthodes de construction de base

La plupart des fours sont aujourd'hui en coquilles d'acier avec un alignement réfractaire. Cet alignement peut être de trois types de base, des briques individuelles placées contre l'alignement, Fig.II.1, un alignement monolithique maintenu à la coquille par des ancrages, Fig.II.2, ou un alignement en fibre de céramique, Fig.II.3. Après l'utilisation des céramiques pendant des milliers d'années, des revêtements monolithiques ont été développés, depuis la fin des années 1960, et ont gagné des parts de marché au détriment de la maçonnerie traditionnelle. Cette tendance est toujours d'actualité en raison de la réduction du temps de mise en œuvre, et demande les compétences requises pour l'installation, avec un coût réduit. Les revêtements en fibre céramique développés récemment ont commencé à gagner en popularité dès les années 1980, mais leur durée de vie étant limitée, leur application est utilisée pour des opérations légères, telles que le support d'isolation et les fours à gaz [1].

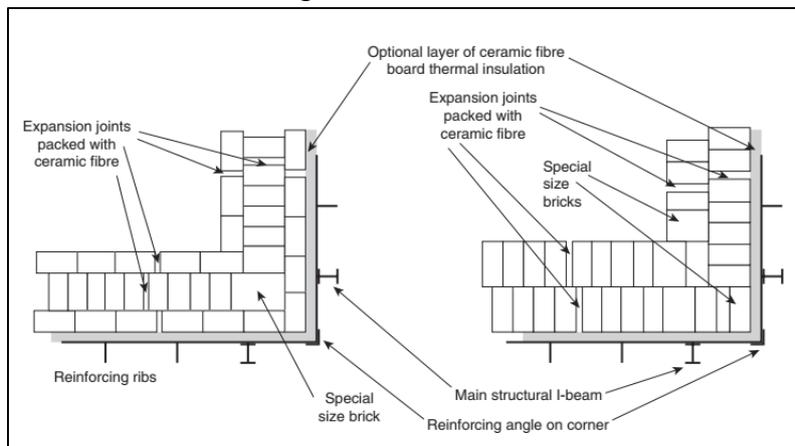


Fig. II.1 : Construction typique de revêtement de brique montrant des couches alternées de brique et des joints de dilatation [1].

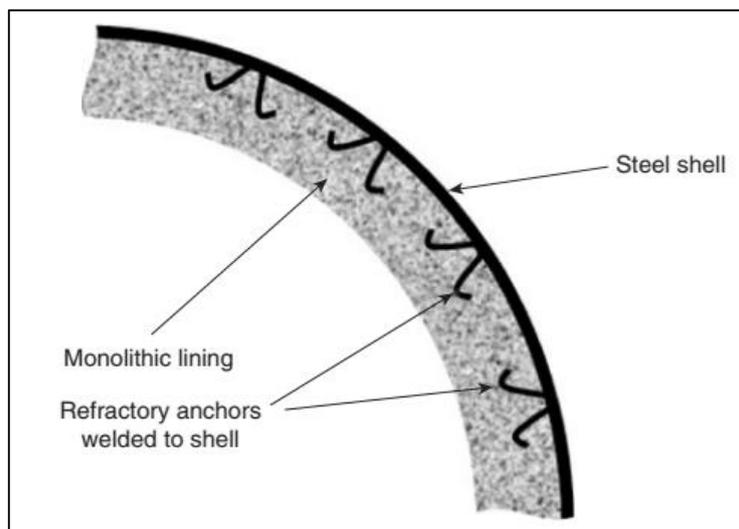


Fig. II.2 : Un alignement monolithique typique maintenu à la coquille par des ancrages [1].

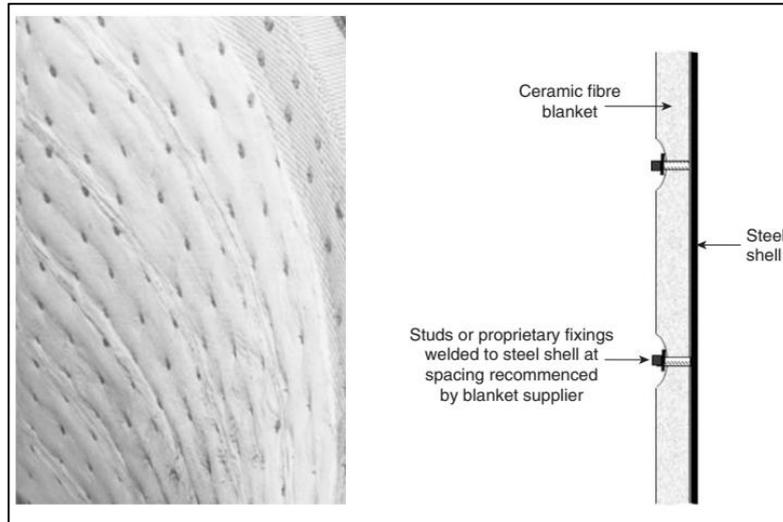


Fig. II.3: Un alignement en fibres de céramique [1].

IV. L'alignement de brique

Cette technique de revêtement traditionnelle est un développement de l'ancien four en brique et permet une grande flexibilité dans la conception. Facilite l'utilisation des fixations pour ancrer les briques à la coquille mais la structure en briques est conçue pour s'emboîter souvent, en utilisant une méthode de liaison modifiée d'alignement de brick. Dans la Fig. II.1 d'autres couches de briques sont montrées ; c'est-à-dire, la couche sur la droite recouvre la couche sur la gauche avec tous les joints décalés, donc une brique est en contact avec au moins quatre autres briques (deux ci-dessus et deux ci-dessous). Le frottement entre ces surfaces maintient la stabilité du mur [1].

Une brique réfractaire dense est nécessaire dans la plupart des fours pour supporter la température interne élevée, mais elle a une conductivité relativement élevée, de sorte que la plupart des fours modernes utilisent une couche de fibres de céramiques, ou des briques isolantes, pour fournir une couche isolante. La fibre de céramique a une très faible conductivité thermique et réduit ainsi considérablement les pertes de chaleur par conduction. Les joints de dilatation doivent être montés à des intervalles réguliers pour éviter de trop solliciter les briques à température élevée. Ces joints de dilatation doivent également être décalés pour empêcher le gaz chaud d'atteindre la coquille [1].

Dans le passé, ces joints ont été laissés ouverts, ou fermés avec la corde d'amiante (n'est plus autorisée), mais sont maintenant fermés avec de la fibre de céramique. Les briques peuvent être assemblées à sec ou utiliser un mortier à haute température à base de ciment à haute teneur en alumine. Le mortier est faible et comprimé quand les briques se dilatent mais quand elles sont assemblées secs, des entretoises en carton ou en acier peuvent être utilisés entre les briques pendant l'installation pour s'adapter à toute expansion irréversible qui se produit pendant le chauffage suivant l'installation. Si le côté chaud de la brique chauffe trop rapidement par rapport au côté plus froid, le côté chaud

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

va se dilater et mettre le côté plus froid sous une contrainte de tension. La plupart des matériaux céramiques sont faibles sous la tension et si la force ultime est localement dépassée une fissure se développera, entraînant un détachement de la face chaude du reste de la brique, un processus connu comme «écaillage», peut être aussi causé par le fait de ne pas permettre un espace d'expansion, Fig. II.4. Dans ce cas, les briques se défont à moins de 250°C bien qu'elles sont chauffées à moins de 50°C par heure [1].

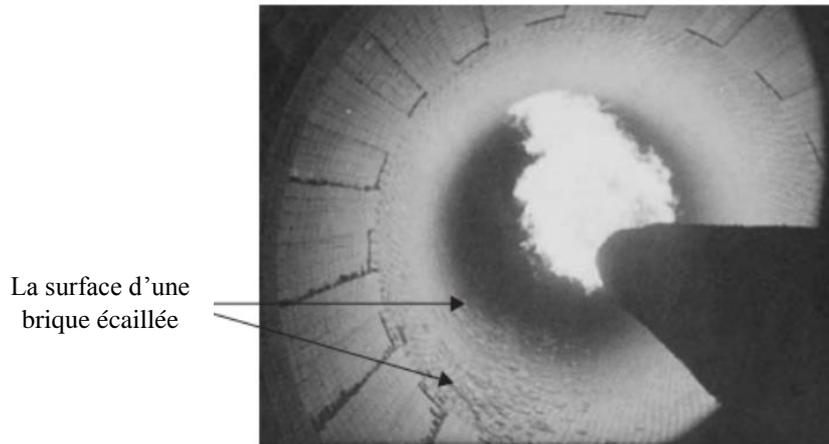


Fig. II.4: Une défaillance de la brique causée par le manque d'espace pour l'expansion [1].

Les briques sont disponibles auprès de nombreux fabricants et peuvent être fabriquées à partir de la plupart des matériaux réfractaires. Briques à base d'argile sont normalement précuites dans un four à des températures supérieures à 1400°C, la température de cuisson réelle dépend du matériau utilisé. D'autres briques utilisent des agents de liaison chimiques et peuvent également être précuites, mais sont parfois fournis non cuites. Les briques sont disponibles dans un large éventail de formes et de tailles, telles que les briques coniques pour fours à arcs et fours rotatifs, Fig. II.5 [1].



Fig. II.5 : brique conique étant installé dans le four rotatif [1].

V. Alignement monolithique

Les revêtements monolithiques sont un développement récent et composés en matériau réfractaire calibré suivant des formats, plus une application d'un liant pour combler le vide. L'un des types fondamentaux de revêtement monolithique, c'est les réfractaires moulables [1].

Un réfractaire moulable est constitué d'un matériau réfractaire gradué et d'un agent de liaison qui est normalement à base de ciment à haute teneur en alumine, aluminés hydratables ou silice colloïdale. Ils sont fournis secs mais prêt à être mélangé dans des sacs en papier. Lorsqu'ils sont requis pour l'utilisation, ils sont mélangés avec la proportion d'eau adéquate et soit moulé dans des moules [1].

Des réfractaires moulables peuvent être considérés comme analogue au béton et sont parfois appelés béton réfractaire. Comme pour le béton, la teneur en ciment affecte les propriétés et des efforts ont été dirigés vers le développement d'additifs qui permettent de réduire la teneur en ciment. Cela a abouti à des réfractaires avec du ciment aussi bas que 3-10% de ciment qui sont connus comme moulable à basse teneur en ciment, tandis que ceux avec moins de 3% sont connus sous le nom de béton coulé ultra-bas. Le principal avantage de la réduction de la teneur en ciment est que le besoin en eau diminue. Puisque l'évaporation de l'eau laisse des vides, donc réduit la résistance, la teneur en eau est sensible car trop d'eau dégrade sévèrement la force [1].

Lorsque le four brûle, généralement la brique assure le maintien d'une température uniforme tout au long, dans un alignement monolithique le gradient de température est développé avec le côté chaud à une température beaucoup plus élevée que le côté ambiant, le revêtement monolithique est ainsi soumis à des températures de durcissement. Dans certains cas, les réfractaires moulables sont renforcés avec des petites aiguilles semblables à des fibres, généralement de 2-6% en poids, pour changer le réfractaire moulable en un composite renforcé par des fibres. Cette technique dépend fortement de la capacité de la fibre à résister à la corrosion à haute température et les aiguilles sont normalement fabriquées en aciers inoxydables austénitiques et super-ferritiques pour maximiser leur résistance à la corrosion à haute température [1].

VI. Installation traditionnelle de réfractaire moulable

En raison de sa résistance relativement faible, la durée de vie d'un monolithique dépend fortement de la conception et de l'installation de l'ancres, Fig.II.2. Ceux-ci sont disponibles auprès du fournisseur de réfractaires et se composent normalement d'un acier inoxydable résistant à la chaleur, Fig.II.6. Les instructions du fournisseur de réfractaires doivent être soigneusement suivies et dans la plupart des cas, elles sont soudées à la coquille du four ou boulonné à travers un trou dans la coquille. Ce dernier est généralement le plus utilisé, parce qu'il permet le mouvement de l'ancre pour accueillir les coquilles et l'expansion réfractaire. Percer les trous et boulonner les ancrages en place exigent beaucoup de main-d'œuvre et la plupart des installateurs utilisent des ancrages Weldon. Ceci élimine la flexibilité inhérente à l'arrangement boulonné et, selon le matériau d'ancrage, peut le rendre vulnérable à la «désintégration de la soudure». Une fois soudés, les forces de dilatation ont tendance à une soudure rigide, provoquant une rupture par fatigue. Une grande proportion d'échecs associés aux revêtements

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

monolithiques provient d'une défaillance de soudures de fixation d'ancrage inappropriées. Les revêtements monolithiques sont installés en moulant le réfractaire dans un moule ou en les pulvérisant sur la coquille du four. Lors de la coulée, le coffrage est utilisé de la même manière que le béton coulé dans les applications de génie civil [1].

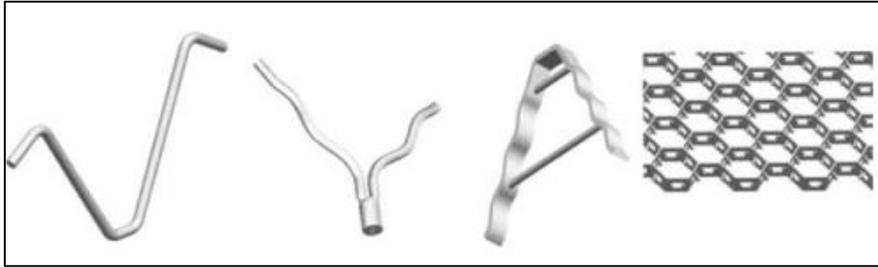


Fig.II.6: les ancrages typiques pour l'installation des réfractaires moulables [1].

La Fig. II.7 montre un montage typique pour couler un revêtement réfractaire sur l'extérieur d'un tuyau de brûleur. Après la mise en place, le matériau doit être vibré pour compacter et réduire les vides, à l'exception des matériaux spécialisés à écoulement libre qui ont des additifs spéciaux qui améliorent les caractéristiques d'écoulement du mélange et permettent l'utilisation d'une quantité d'eau adéquate [1].

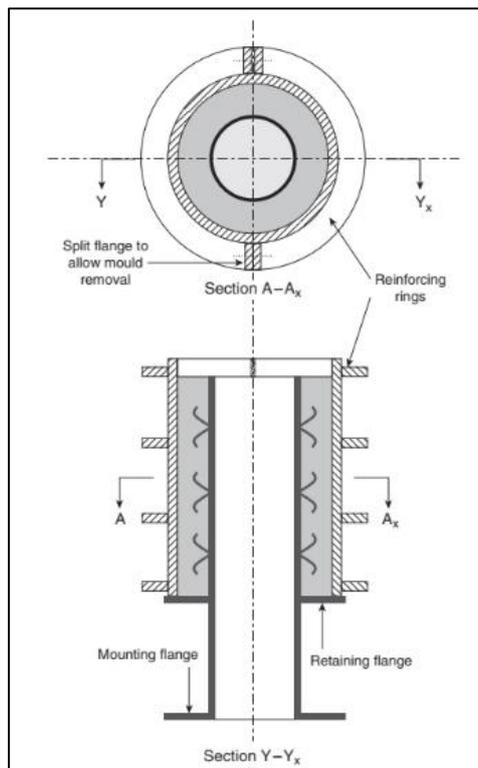


Fig. II.7: montage typique pour couler un revêtement réfractaire sur l'extérieur d'un tuyau de brûleur [1].

VII. Tailles et formes des réfractaires

Divers matériaux réfractaires ont été formés dans de nombreuses tailles et formes, collectivement appelées «briques réfractaires», évoluant en tailles et formes standard telles que droites, petites, fendues, savonneuses, en biseau, inclinées en bout, inclinaison latérale, encolure, clé, arche, plume, jambage, bonde, cercle et bloc. La Fig. II.8 montre quelques-unes des nombreuses formes disponibles. Les garnissages de four peuvent avoir une forme simple ou multicouche. Les monocouches sont généralement suffisantes pour les fours fonctionnant à des températures inférieures à 1400°C. Les doublures pour les fours modernes à haute température sont presque toujours multicouches. La couche à haute température, qui forme la surface intérieure du réfractaire, dénommé «hotface», est soutenu par une ou plusieurs couches de matériaux réfractaires et / ou isolants moins lourds, puis enfin la coque métallique extérieure ou coquille (coldface). Les concepteurs de fourneaux doivent s'assurer que la température aux interfaces entre les différents réfractaires et l'isolation les garnitures ne dépassent pas la cote de température de sécurité de la couche suivante. Les fournisseurs ont des programmes informatisés pour la vérification de ces exigences pour les clients.

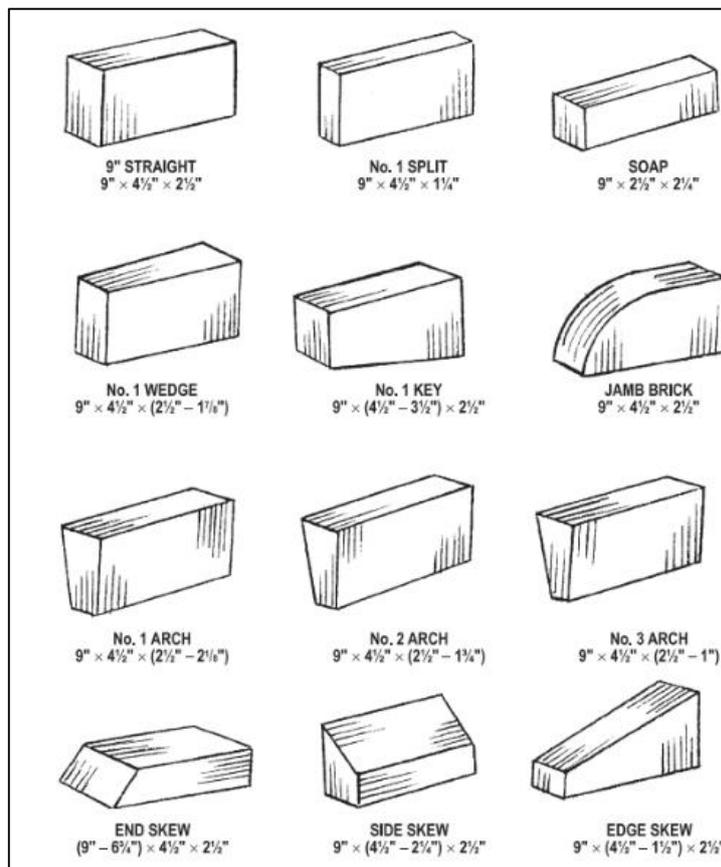


Fig. II.8 : quelques formes et tailles typiques des briques réfractaires [2].

VIII. La structure métallique du four

La structure métallique se compose de la coquille d'acier avec un support de la charge en acier aussi. Dans certains modèles, tels que les fours rotatifs et les fours à cuve, la coquille supporte toute la charge et aucun cadre n'est utilisé. Même lorsqu'un cadre est

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

utilisé, la coquille a la capacité de supporté la charge. Une défaillance réfractaire peut rapidement chauffer la coquille et réduire les capacités de charge et dans ce cas le four doit être fermé et l'alignement réparé, sauf si le cadre est conçu pour accueillir la charge supplémentaire [1].

De nombreux composants du four porteur de charge fonctionnent à température élevée. Pour ces applications, le choix du matériau est essentiel pour un fonctionnement sûr et une longue durée de vie. Les facteurs qui nécessitent une considération comprennent la gamme de température de fonctionnement, la présence de charges cycliques et l'atmosphère environnante. La plupart des composants résistants à la chaleur sont basés sur des aciers inoxydables. Les applications à haute température de l'acier inoxydable sont souvent mal comprises par les concepteurs et les ingénieurs de maintenance bien que les propriétés soient bien documentées. Ces malentendus des propriétés ont conduit à des défaillances causées par la perte de couche d'oxyde passive, les changements de phase et la précipitation du carbure. Ces défaillances sont courantes et peuvent souvent être attribuées à un mauvais choix de matériau. L'échec est généralement suivi d'une recherche d'un meilleur matériau, qui peut être interpréter comme un matériau à température de service, une recherche sur la véritable cause de défaillance entraînant la révision du choix des matériaux [1].

Par exemple, la Fig. II.8 montre la panne subie par un brûleur dans un four rotatif. Le tuyau d'air primaire principal a été fabriqué à partir d'un acier inoxydable A316 avec l'intention de résister à la corrosion d'entartrage par l'air de combustion chaud à 850°C, ainsi que la chaleur de rayonnement de la flamme. Cependant, l'air primaire est à 20°C et fournit un certain refroidissement de sorte que le tube du brûleur fonctionne généralement à 650-750°C. Le brûleur a été conçu pour une durée de vie de 20 ans mais après seulement trois mois de fonctionnement, le tuyau du brûleur s'est rompu en se fissurant longitudinalement, comme illustré. À la température de fonctionnement, l'acier inoxydable A316 est vulnérable à la précipitation de carbure de chrome qui laisse les joints des grains pauvre en chrome. En conséquence, la couche d'oxyde est détruite et le matériau n'est plus inoxydable et le fer exposé devient vulnérable à l'oxydation rapide. Face à l'opposition significative du personnel d'entretien et du fournisseur du brûleur, le tuyau du brûleur a été remplacé par l'acier inoxydable A304L de qualité inférieure. Ce matériau est faible en carbone, ce qui réduit la capacité de précipiter les carbures de chrome, de sorte que la protection a été maintenue, une durée de vie de plus de dix ans a été atteinte [1].

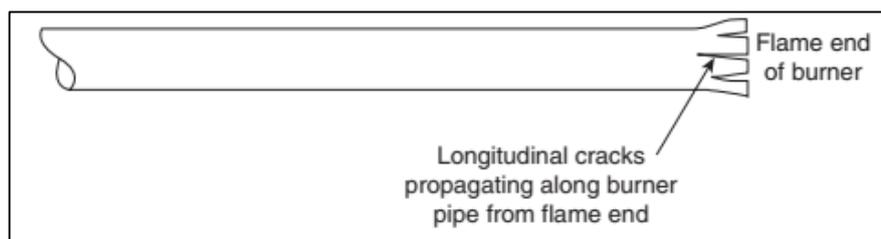


Fig. II.9 : défaillance d'un tube de brûleur en acier inoxydable A316 [1]

IX. Construction du toit du four

Pour les fours, la conception du toit est particulièrement problématique car, contrairement au toit de bâtiment classique où la structure de soutien est ci-dessous et peut donc soutenir le toit, la haute température à l'intérieur d'un four nécessite que la structure soit externe. Cela met potentiellement le matériau réfractaire sous tension, dont les caractéristiques sont faibles, car il est maintenu par la structure.

Tous les premiers fours utilisaient un toit en brique ou une modification de l'arc. L'arc est construit sur un support temporaire dans lequel des briques coniques sont utilisées (Fig. II.9). Une fois terminé le poids des briques crée une force vers le bas qui se traduit par une force latérale sur les murs. Si cette force non décelée se propagerait aux murs, le toit vas s'afforcer, de sorte que les murs sont consolidés par des doubles poutres en « I » liés ensemble par un support de maintien (le buckstay) qui empêche les murs de se déplacer vers l'extérieur. Ainsi, le toit est soutenu par la tension dans le buckstay en acier et la compression dans les briques.

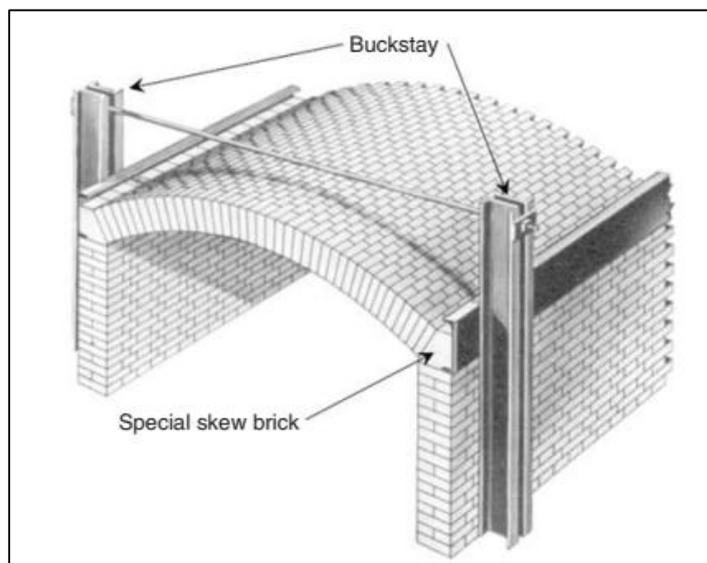


Fig. II.10: Construction typique d'un toit en arc [1]

X. Matériaux réfractaires en céramique

Les fours métalliques sont constitués de matériaux réfractaires, des briques de construction et de différents bétons.

Les réfractaires sont des matériaux capables de supporter des températures au-dessus de 1580°C et résister à l'influence chimique et physique du laitier, le métal en fusion et des gaz dans les fours [11].

X.1. Classification des réfractaires

On peut classer les matériaux réfractaires d'une manière suivante :

1. D'après la réfractarité où on peut nommer trois espèces des réfractaires :
 - a. la réfractarité de 1580 à 1770°C ;
 - b. la réfractarité de 1770 à 2000°C ;

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

- c. la réfractarité au-dessus de 2000°C.
2. D'après la composition minéralogique où les matériaux sont divisés en :
 - a. Silicieux à la base du SiO₂ ;
 - b. aluminosilicates à la base des Al₂O₃ et SiO₂ ;
 - c. Magnésiens à la base de MgO ;
 - d. Chromique à la base des Cr₂O₃ et MgO ;
 - e. Carbonique à la base du C ;
 - f. Zirconiques à la du ZrO₂ ;
 - g. Carbures à la base des oxydes purs des MgO, Al₂O₃, BeO, et des autres.
3. D'après les types d'oxyde où les réfractaires peuvent être suivant :
 - a. acides (SiO₂) ;
 - b. basiques (MgO, CaO) ;
 - c. neutres (Al₂O₃).
4. D'après le procédé de la fabrication où les réfractaires sont divisés en deux groupes : naturels et artificiels.

Les derniers se divisent (à leur tour) en :

 - a. Pressés ;
 - b. Fondus ;
 - c. Damés.

En fonction du traitement thermique on distingue les matériaux cuits et non cuits.

5. D'après la complexité de la forme où on distingue les réfractaires simples et ceux de forme complexe.
6. D'après la destination où on utilise les réfractaires pour la construction du haut fourneau, pour l'empilage de la construction des récupérateurs et des régénérateurs et pour le garnissage des poches [11].

Les matériaux réfractaires sont généralement spécifiés en fonction du matériau céramique prédominant dans le mélange. Nous avons donc une classification générale des réfractaires du four en un certain nombre de groupes, les plus communs parmi ceux-ci étant :

- Réfractaires silicieux 70-97% SiO₂, 0,5-15% Al₂O₃ ;
- Réfractaires d'alumosilicate 20-90% Al₂O₃, 5-70% SiO₂ ;
- Réfractaires magnésiens ;
- Réfractaires Chromite, magnésite / chromite, 0-40% Cr₂O₃, 13-90% MgO ;
- Réfractaires zirconique : SiO₂, > 95% ZrO₂ ;
- Réfractaires de carbure : > 99% C, >90% SiC ;
- Réfractaires carboniques ;
- Bétons coulis et enduits réfractaires ;
- Réfractaires oxydes ;
- Briques de construction.

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

Les éléments métalliques en trace, tels que TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO et MnO , sont également présent dans la plupart de ces réfractaires et peut avoir un effet sur leurs propriétés.

Les fabricants fournissent des réfractaires sous diverses formes pour leur utilisation dans les fours. La forme la plus commune est celle d'une brique, ayant soit des côtés parallèles pour les surfaces planes ou des côtés coniques pour les constructions en arc. Les briques peuvent être précuites par le fabricant dans un four avant l'installation. Dans le cas de ces deux derniers types de briques, elles doivent être durcies in-situ dans le four après installation selon un cycle de chauffage strict, fourni par le fabricant, avant qu'elles puissent être soumises à un fonctionnement normal. Le réfractaire est également fourni en tant que matériau broyé dans des sacs.

Les matériaux isolants sont généralement fournis sous forme de briques légères, feuilles, ou en tant que matériau en vrac adapté pour le remplissage à sec ou la pulvérisation. Les feuilles de fibres de céramique et les blocs de calcite peuvent être traités en surface pour durcir la face, la rendant imperméable à l'humidité et permettant ainsi au matériau à être utiliser pour certaines tâches à la place d'un réfractaire conventionnel [11].

1. Réfractaires silicieux

Les réfractaires de silice fabriqués des quartzites sont largement réponsus dans les industries de l'acier ; ils contiennent à peu près 93% de SiO_2 .

Ils sont toujours utilisés dans le haut fourneau, toits de four à arc et l'industrie du verre pour les parties supérieures des régénérateurs. Les réfractaires silicieux, parfois appelés semi-silice, contiennent un minimum 80% de silice et 10-15% d'alumine. Ils sont extrêmement résistants aux cendres et aux scories en formant une couche visqueuse, et sont stables en volume. Ils sont utilisés dans les parties inférieures des régénérateurs et les fours de réchauffage [11].

2. Réfractaires d'alumosilicate

Les réfractaires d'alumosilicate contient plus de 30% de Al_2O_3 et à peu près 65% de SiO_2 . En fonction de la teneur en SiO_2 et Al_2O_3 parmi les réfractaires d'alumosilicate on distingue les réfractaires demi-acide (de 15 à 45% de Al_2O_3), de chamotte (de 30 à 45% de Al_2O_3) et très alumineux (plus de 45% de Al_2O_3).

a. Réfractaires de chamotte

La chamotte est une argile réfractaire cuite à température de 1200 à 1400°C.

La réfractairité des produits de chamotte varie de 1580 à 1700°C. On utilise les produits de chamottes pour les revêtements de poches de coulée pour la construction de la partie basse des fours martins, pour le haut fourneau.

b. Réfractaire demi-acide

La réfractairité demi-acide est moins que celle de chamotte.

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

c. Réfractaire très alumineux

Ce sont les produits qui se composent de 45% de Al_2O_3 [11].

3. Réfractaires magnésiens

a. Réfractaire de la magnésie

Les réfractaire de la magnésie contient de l'ordre de 95% de l'oxyde de magnésium.

Les réfractaires de la magnésie se caractérisent par une haute résistance et une bonne stabilité à laitier basique. Si on ajoute dans la masse réfractaire de 1 à 5% de Al_2O_3 , alors la résistance thermique et la stabilité réfractaire à laitier augmentent.

Les produits de ces réfractaires sont utilisés pour garnissage des parois et de sol des fours martins, les parois des fours électrique à arc et les parois des fours à réchauffage.

b. Réfractaire de dolomie

On obtient les réfractaires de dolomie du minérale de dolomite ($\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$). Il se compose de 40% de CaO et de 35% de MgO . De plus la dolomie brute comporte les additions suivantes : SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 et autres.

Ils ont une forte résistance à l'écrasement à froid et réfractarité normale sous la charge.

Les réfractaire de dolomite sont utilisés pour le garnissage des parois d'arrière des fours martin, pour les parois des fours électriques, et pour le bourrage des sols martin.

c. Réfractaire de forstérite

Les produits des forstérite sont la base de $2\text{MgO}.\text{SiO}_2$. Ils contiennent 55% de MgO et 35% de SiO_2 . Les produits de forstérite sont utilisés dans les empilages de régénérateurs et dans les fours à cuire.

d. Réfractaire de talc

Le talc naturel est le silicate hydraté du magnésium ($\text{MgO}.4\text{SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$). La réfractarité est de 1550°C . On emploie le talc pour la fabrication des briques et des produits utilisés dans la maçonnerie des sols des fours à réchauffer [11].

4- Réfractaires alumineux

Les réfractaires d'alumine sont fabriqués à partir de minéraux à haute teneur en alumine, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 60\%$, comme la bauxite ou l'alumine fondue avec divers liaisons de minéraux. Ces réfractaires sont résistants à l'attaque par l'oxyde de fer et les scories basique, et sont utilisés dans les zones à haute température ($> 1700^\circ\text{C}$) en réservoirs de verre, fours céramiques, fours tunnels et fonderies d'alumine [11].

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

5- Réfractaires Chromite, magnésite / chromite

Le minerai de chromite $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ est une base essentielle des réfractaires chromés.

Il existe quelque types de réfractaires chromeux tels que :

a. Réfractaires de chromite (à 30% de Cr_2O_3)

Le minerai de chromite est la matière brute pour la production de ces réfractaire. Lors du changement, les réfractaires de chromite possèdent la basse température de la déformation. De ce fait les réfractaires de chromites ne sont pas largement réponsus.

Dans la plupart des cas on utilise ces réfractaires comme masse bourrée. Cette masse se compose de 92 à 97% de chromite très broyé, de 3 à 4% d'argile réfractaire et de 3 à 6 % de verre à silicate.

b. Réfractaires de chromo-magnésie (de 15 à 30% Cr_2O_3 et 24% de MgO)

La charge se compose de 50 à 60% de chromite et de 40 à 50% de magnésie cuite. La réfractairité des produits de chromo-magnésie est de 1950°C ; ils ont une bonne solidité aux laitiers basiques et acides.

c. Réfractaire de magnésie-chromite :(de 8 à 15% de Cr_2O_3 et de 65 à 70% de MgO)

Lors de la fabrication des réfractaires des magnésie-chromite la charge se compose de 40 à 60% de chromite et de 35 à 60% de magnésie cuite.

La réfractairité des produits de magnésie chromite atteint 2000°C . C'est pourquoi on utilise ces réfractaires dans la construction des voutes des fours aussi bien que la maçonnerie des parois et des sols des fours électriques et pour le garnissage du convertisseur à oxygène [11].

6- Réfractaires zirconique

La base des réfractaires zirconiques se compose de ZrO_2 (la température de la fusion de ZrO_2 est de 2700°C). On distingue deux types des réfractaires zirconiques :

a. Réfractaires zirconiques : (fabriqués du bioxyde de zirconium pur)

Lors de la production des réfractaires zirconiques on utilise comme matière brute le minerai de zircons contenant de 80 à 99% de ZrO_2 et des additions, telles que SiO_2 , Fe_2O_3 et Al_2O_3 . La charge se compose de 94 à 96% de minerai de zircone moulu et de 4 à 5% de chaux.

Les produits zirconiques ont une grande réfractairité (à peu près 2500°C), une bonne stabilité à laitier et une bonne résistance thermique.

Les creusets zirconiques sont utilisés pour la fusion du platine, de l'iridium et du verre de quartz.

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

b. Réfractaires de zircone : (fabriqués du minéral de zircon)

Ils contiennent de 59 à 63% de ZrO_2 et de 32 à 34% de SiO_2 .

La réfractarité des réfractaires de zircone est de (1900-2000°C). Les réfractaires sont utilisées au garnissage des bains salins [11].

7- Réfractaires de carbure

Ce sont les réfractaires qui se composent des combinaisons chimiques des métaux avec le carbone. Les réfractaires de carbure ont une haute réfractarité et une température de la fusion. Il est cité ci-dessous les températures de fusion de certains carbures :

ZrC-3532°C;	TaC-3880°C;	NbC-3608°C;
WC-3422°C;	TiC-3160°C;	ThC-2625°C.

La conductivité de chaleur et la dureté des carbures sont élevées. Cependant ils ont une basse solidité au milieu oxydant. Dans la métallurgie le plus souvent on utilise les produits de carborundum (SiC).

a. Réfractaire de carborundum

Le carbure de silicium est appelé carborundum. On obtient le carborundum dans les fours électriques à l'aide de la fusion du lit de fusion à la température de 2000°C. Le lit de fusion se compose du sable quartzéux et du coke de pétrole. Pour évacuer les impuretés nocives (Al_2O_3 , Fe_2O_3 et FeO), on ajoute dans le lit de fusion du sel commun. La réaction chimique d'obtention de carborundum est la suivante :



On fabrique des réfractaires de carborundum les tubes des récupérateurs, les mouffles et les réchauffeurs des fours électriques [11].

8- Réfractaires carboniques

Les réfractaires de carbone pur sont fabriqués à partir de coke métallurgique dur, coke de pétrole brûlé ou graphite naturel. Elles sont habituellement collées avec du goudron. Ils ont une réfractarité très élevée, une haute résistance et rigidité et sont inertes aux scories, au métal et aux atmosphères réductrices. Ils réagissent et gazéifient au-dessus de 350°C avec les oxydes métalliques. Ils sont utilisés dans les foyers de hauts fourneaux et bains de décapage à l'acide (généralement du coke métallurgique) et électrodes du four électriques (coke de pétrole ou graphite). Les réfractaires de carbure de silicium sont fabriqués à partir de carbure de silicium lié à l'argile, ou par frittage à haute température. Ils ont une très haute conductivité thermique, résistance mécanique, résistance à la corrosion et résistance aux chocs thermiques. Ils ont généralement une température de travail de 1600°C dans des atmosphères oxydantes [1].

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

9- Bétons coulis et enduits réfractaires

Le béton possède une bonne plasticité et une bonne capacité à se durcir à l'atmosphère et acquiert des propriétés réfractaires après le traitement thermique.

Lors de la fabrication des bétons réfractaires on utilise, comme matériaux de liaison, le portland, le ciment alumineux, magnésien et de dolomite.

Il est à noter que le ciment alumineux est largement utilisé pour la construction des fours, car il est caractérisé par une grande vitesse de durcissement.

En général les bétons réfractaires sont utilisés pour remplacer les matériaux réfractaires ordinaires à la construction de certaines parties des fours.

Sauf les exigences ordinaires qu'on émet aux matériaux réfractaires les bétons réfractaires doivent avoir la constance de volume et l'invariabilité de la solidité mécanique pendant le réchauffage et l'exploitation des fours.

a- Le coulis réfractaire

C'est une masse semi-liquide. Lors de la construction des fours les coulis réfractaires sont utilisés pour faire couler des interstices entre les briques.

La réfractarité des coulis doit être pareille à celle de la maçonnerie de brique.

Pour la maçonnerie de silice on utilise les coulis réfractaire à la base de la silice fine avec l'addition de l'argile réfractaire (de 10 à 12%), pour la maçonnerie de chamotte à la base du mélange de la chamotte en poudre de 70 à 85% et de l'argile réfractaire plastique de 15 à 30% et pour les maçonneries de magnésie et chromo-magnésie on comble des joints de la magnésie en poudre.

b- Les enduits réfractaires

Ils se composent des oxydes réfractaires et des fondants très dispersés. Ils servent à protéger la surface de travail de la maçonnerie réfractaire et l'action corrodante du milieu de four et de diminuer la perméabilité aux gaz de la maçonnerie [11].

10- Réfractaires oxydes

La température de fusion des oxydes de certains éléments et leur réfractarité sont pareilles. Ces oxydes ont une bonne solidité mécanique à la haute température et une bonne stabilité au milieu oxydant. Les produits des oxydes purs sont utilisés dans les chambres de combustions des installations nucléaires.

11- Briques de construction

On fabrique les briques de construction de l'argile fusible ayant la réfractarité de 1350°C environ.

Dans la construction des fours métallurgiques on utilise la brique de construction pour remplacer les réfractaires des parties extérieurs des fours qui ne sont pas réchauffées pendant le fonctionnement du four.

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

De plus on construit les cheminées en briques de construction.

La stabilité thermique de la brique de construction est basse, c'est pourquoi elle ne doit pas être utilisée dans la maçonnerie lorsqu'il y a de changement brusque de température [11].

X.2. Propriétés physiques des réfractaires

Parmi les propriétés physiques que possède les réfractaires on trouve :

1. porosité

La stabilité des réfractaires dépend de la porosité qui varie dans de larges limites : de 1% pour les réfractaire fondus à 80% pour les calorifuges [11].

2. perméabilité aux gaz

S'il y a une différence entre la pression atmosphérique et celle dans l'espace du four, alors les gaz pourront passer par les pores à travers des matériaux réfractaires. Lors de l'augmentation de la température la perméabilité aux gaz est réduite (car dans ce cas la viscosité elle-même augmente) [11].

3. conductibilité de la chaleur

En général la conductivité de la chaleur des réfractaires doit être basse, sauf le cas lorsque la chaleur est transmise à travers des réfractaires (par exemple dans les récupérateurs et les moufles).

La conductibilité de la chaleur dépend de la nature de la matière, de sa porosité et de sa température.

Lors de l'augmentation de la température, la conductibilité de la chaleur des réfractaires augmente sauf la magnésite et la forstérite. Lors de l'augmentation de la porosité, la conductivité de la chaleur est réduite [11].

4. conductivité électrique

La plupart des réfractaire à la basse température sont des diélectriques ; l'augmentation de la température favorise l'augmentation de la conductibilité électrique.

La composition des réfractaire influe sur la conductivité électrique [11].

5. capacité thermique

La capacité thermique des réfractaires joue un grand rôle dans les choix des matériaux réfractaires, par exemple pour les régénérateurs et les fours à fonctionnement discontinus. En général la grandeur de la capacité thermique des réfractaires varie de 0.4 à 1.7 KJ/Kg degré.

Si la température des réfractaires augmente la capacité thermique augmente aussi [11].

X.3. Propriétés fonctionnelles des réfractaires

Les tests réfractaires sont réalisés selon des normes internationales (ASTM, BS et DIN). Un certain nombre des résultats d'essais importants sont utilisés pour permettre au réfractaire correct d'être choisi. Ceux-ci inclus :

- Densité (la densité apparente) : exprimée en poids / unité de volume y compris les pores ;
- Gravité spécifique réelle : le poids du volume unitaire du matériau écrasé par rapport au poids de l'unité de volume d'eau ;
- Gravité spécifique apparente : le poids du volume unitaire de la brique réfractaire par rapport au poids de l'unité de volume d'eau ;
- Porosité : le rapport entre le volume poreux et le volume total, généralement exprimé en pourcentage ;
- Résistance à l'écrasement à froid : test de résistance mécanique standard d'un cube en compression. Exprimé en force / unité de surface ;
- La conductivité thermique : est indiquée à plusieurs températures, car elle dépend généralement de la température ;
- Chaleur spécifique : indiquée comme une valeur unique, car elle est relativement insensible à la température ;
- Changement dimensionnel permanent sur le chauffage : l'irréversible expansion / contraction qui se produit en chauffant à 1500°C pendant deux heures et de refroidissement. Généralement exprimé en pourcentage de la longueur ou du volume d'origine ;
- Réfractairité : une mesure des propriétés de résistance à la chaleur de réfractaires ;

La réfractairité est une propriété des matériaux pour conserver la solidité mécanique sous l'action de la haute température.

Elle dépend de la composition chimique des réfractaires et de la présence des additives.

Elle est déterminée de la méthode suivante :

On fabrique des pyroscopes en pyramides triangulaires tronqués de la matière de l'essai. Ensuite les pyroscopes sont placés dans un four spécial à réchauffer avec les pyramides d'étalon ayant la réfractairité déterminée.

On augmente la température dans le four jusqu'à 1000°C à la vitesse de 25 degrés/heure, ensuite de 1000°C à 1500°C à 10degrés/heure et à la fin au-dessus de 1500°C à 1 degré/heure. Il est à noter que lors du chauffage à l'intérieur de la pyramide la phase liquide se forme. Les pyroscopes commencent à se déformer sous l'action du poids propre. Ce n'est que d'après le moment du contact des sommets. Les pyroscopes examinées et ceux d'étalon à l'intérieur du four peuvent juger de même réfractairité des pyroscope dont on vient de parler.

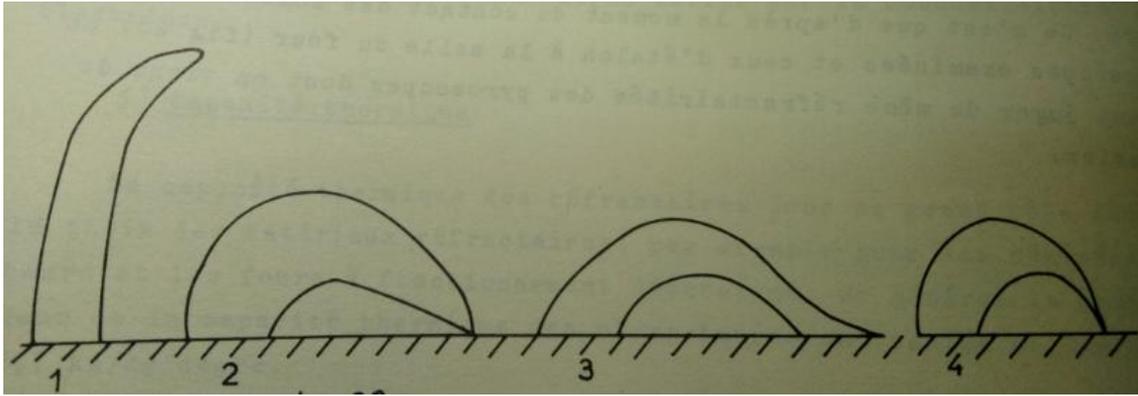


Fig. II.11: détermination de la réfractarité [11]

1-3 pyroscoptes d'étalon – 4-pyroscope examiné.

- Résistance thermique

La résistance thermique est une capacité des réfractaires pour soutenir le changement brusque de la température sans démolissement. La résistance thermique est exprimée en nombre de fois qu'une pièce d'essai du réfractaire va subir un cycle de chauffage à 1000°C, puis refroidi par choc dans l'air avant la défaillance.

- Résistance mécanique

Les matériaux réfractaires doivent avoir une bonne résistance mécanique puisque pendant le service dans les fours ils sont soumis au serrage et au frottement mécanique.

Dans les fours, des changements réels sur les réfractaires atteignent 30 N/cm². La résistance mécanique des réfractaires varie dans de larges limites (voir le tableau II.1)

- Stabilité à laitier

La stabilité à laitier est une capacité pour résister à l'action corrodante des laitiers. Cette propriété dépend de la composition chimique des réfractaires et du laitier, de la porosité des matériaux et de la température. Le laitier touchant au réfractaire réagit non seulement avec la surface, mais pénètre par les pores à l'intérieur des réfractaires. C'est pourquoi lors de la construction des fours à fondre on utilise les réfractaires à basse porosité. Les réfractaires basiques (magnésie, magnésie-chromite et dolomie) sont stables contre l'action corrodante des laitiers basiques ; réfractaires acides (silices et semi-acide) sont stables contre l'action corrodante des laitiers acides. Plus proche est la combustion chimique du laitier à la composition chimique du réfractaire, plus petite est l'action corrodante des laitiers.

La stabilité est déterminée par la méthode à creuset (Fig. II.12). D'abord on fabrique le creuset du réfractaire examiné et puis on remplit le creuset du laitier. Ensuite on pose le creuset dans le four réchauffé jusqu'à 1500°C.

On maintient cette température pendant 3 à 4 heures. La stabilité à laitier est déterminée d'après le degré de la corrosion du creuset.

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

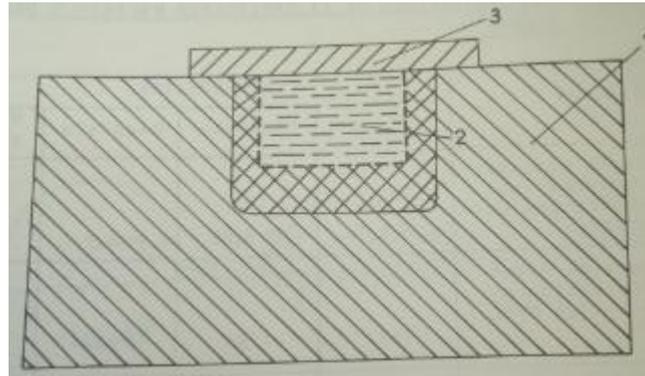


Fig. II.12: détermination de la stabilité à laitier par la méthode à creuset [11].

1-réfractaire – 2 laitier – 3 couvercle.

- Constance de volume des réfractaires

La conservation de la constante de volume est une propriété positive des réfractaires.

Lors du service dans les fours les réfractaires changent leurs volumes à cause de l'élargissement thermique et du retrait [11].

On détermine l'augmentation complémentaire du retrait des réfractaires par la formule suivante :

$$V = \frac{v_1 - v_0}{v_0} \cdot 100\% \dots\dots\dots 1$$

Où :

v_0 : Volume initial ;

v_1 : Volume après le chauffage.

Tableau II.1: caractéristiques de la résistance mécanique des réfractaires [11].

Indices	Réfractaires			
	Silice	Chamotte	Magnésie	Magnésie chromite
Limite de la résistance à la compression (à la température normale) en KN/cm ²	2.45 - 2.94	0.98 - 6.88	2.94 - 4.9	2-5
Température de début de la déformation au chargement 19.6N/cm ² en °C	1630	1350	1500	1520
Réfractairité en °C	1730	1730	2000	2000

XI. Réfractaires isolants

La plupart des matériaux réfractaires examinés jusqu'ici dans cette section sont caractérisés par une conductivité thermique élevée, ce qui conduit à une perte de chaleur importante à travers les parois du four. Les matériaux réfractaires isolants sont caractérisés par une grande porosité, une faible résistance à l'écrasement, réfractarité relativement faible et faible conductivité thermique. Ils peuvent être utilisés en tant qu'isolant de face chaude (c'est-à-dire en tant que matériau réfractaire autonome) ou en tant que matériau de support derrière un réfractaire de service supérieur. L'utilisation de l'amiante en tant que matériau isolant est maintenant interdite en raison des risques de santé liés à son application et à son élimination.

XII. Alliages à haute température

En raison de sa capacité à passiver le fer, le chrome est un composant de base de la plupart des alliages à haute température. Le nickel est également très important parce que, bien qu'il ne forme pas une couche d'oxyde aussi facilement que le chrome, il est très résistant à l'oxydation en raison de sa réactivité relativement faible. En pratique, la plupart des aciers inoxydables résistants à la chaleur sont des alliages de fer, de chrome et de nickel avec d'autres composants de trace tels que le molybdène, le titane, le silicium et l'azote ajoutés pour modifier les propriétés et fournir des performances améliorées dans des conditions spécifiques [11].

XII.1. Aciers au carbone

Les formes et la qualité structurelles de la norme (ASTM 36) fournissent habituellement le service satisfaisant pour les supports de four externes, les coques et les composants externes du convoyeur et du balancier.

Les effets de la dilatation thermique doivent être pris en considération [2].

XII.2. Aciers alliés

Les aciers alliés fer-carbone-chrome-nickel sont largement utilisés dans des parties des fours tels que les récipients de traitement thermique, les composants de sole, les chaînes d'entraînement, les boîtes de carburation, les récupérateurs, les brûleurs régénératifs, les pièces de brûleur et les tubes radiants. La sélection du métal doit tenir compte du fait que le taux d'expansion des aciers inoxydables austénitiques est presque le double de celui de l'acier ordinaire.

Dans ce qui suit, une liste des aciers inoxydables utilisés dans la conception des fours :

- Acier inoxydable austénitique 309 qui a une excellente résistance à l'oxydation, haute résistance et bonne résistance au fluage à température élevée, satisfaisant pour le service dans certaines applications à 1093°C.
- Acier 310 qui a une résistance à l'oxydation légèrement plus élevée et résistance au fluage plus élevée.
- Acier 316 qui est résistif à la corrosion de la plupart des produits chimiques, particulièrement l'acide sulfurique, il a une bonne résistance à la traction et au fluage à des températures élevées.

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

- Acier 442 ferritique au chrome qui est résistant à la corrosion, à une faible résistance à la traction.
- Acier 446 qui est résistant à la chaleur jusqu'à 1177°C et résiste à l'oxydation mieux que l'acier 310, mais a beaucoup moins de résistance à la traction et au fluage que l'acier 310 à haute température [2].

Les aciers inoxydables sont classés en cinq groupes familiaux distincts selon la teneur en chrome et en nickel (les aciers inoxydables austénitiques, les aciers inoxydables ferritiques, les aciers inoxydables austino-ferritiques, les aciers inoxydables martensitiques et les aciers inoxydables de durcissement par précipitation). Chacun de ces groupes présente des propriétés distinctes (Tableau II.2). Au sein de ces cinq groupes familiaux, il y a une gamme énorme d'alliages individuels et un système de classification presque stupéfiant comprenant l'original AISI, DIN et classements de propriété des fabricants, avec les nouveaux systèmes UNS et Euronorm. A l'intérieur du groupe austénitique, il y a des qualités spéciales résistant à la chaleur avec une augmentation de la teneur en chrome et en nickel par rapport aux qualités standard (Cr : 20-24% et Ni : 10-35%). Dans le cas où le carbone est inférieur à 0,08%, la précipitation du carbure de chrome à des températures modérées est l'un des principaux modes de défaillance de l'acier inoxydable. Ces aciers présentent une bonne résistance à l'oxydation à haute températures (950-1100°C). Ces aciers austénitiques résistants à la chaleur sont utilisés pour les doublures de moufles, les tubes radiants et d'autres parties du four.

Choix des matériaux pour la réalisation d'un four

Tableau II.2 : la composition et les caractéristiques des cinq groupes familiaux des aciers inoxydables [1].

Groupes d'aciers	Cr (%)	Ni (%)	Autres éléments	Caractéristiques et utilisations typiques
Austénitique	>18	>8	C, Mo	Excellente résistance à la corrosion dans la plage de 200°C à 900°C. Largement utilisé dans les fours et les applications alimentaires.
Ferritiques	12-18	-	-	Résistance modérée à la corrosion. Utilisé pour les systèmes d'extraction des fumées.
Duplex	18-28	4.5-8	Mo, N	structure cristalline mixte ferritique / austénitique. A une résistance à la traction et à la limite d'élasticité élevées et une haute résistance contre la fissuration par corrosion.
Martensitique	12-18	-	C	Haute résistance et dureté peut être développé mais mauvaise soudabilité. Utilisé pour les lames de couteau, arbres et broches, buses et ressorts.
Durcissement par précipitation	>17	>4	Cu, Ni	Bonne résistance à la corrosion. Bonne résistance à haute température (950-1100 °C). Utilisé pour les arbres à haute résistance et les axes de soupape fil à haute résistance.

XII.3. Les alliages à haute teneur en nickel

En plus des aciers inoxydables considérés ci-dessus, une gamme d'alliages à haute teneur en nickel est disponible avec des températures de service jusqu'à à 1150°C. Ces alliages sont généralement connus par leurs noms commerciaux tels que Hastelloy, Inconel, Incoloy, et Nimonic, chacun représente une famille d'alliages différente. Le devoir de service ne peut pas être déduit à partir de la composition chimique seule puisque beaucoup de ces alliages subiront des régimes de traitement thermique complexes pour optimiser la structure pour le service prévu et il est essentiel que les fiches techniques de performance soient obtenues auprès du fabricant.

XIII. Conclusion

Le choix des matériaux pour la fabrication dépend de plusieurs facteurs, par soucis d'économie et en même temps de fiabilité du four, il faut prendre en compte l'environnement où seront installés. Les matériaux et alliages doivent tenir compte des caractéristiques mécaniques appropriés, la résistance aux hautes températures et la résistance aux phénomènes de corrosion. Il faut prendre en compte aussi que les phénomènes de transfert de chaleur qui se passent à l'intérieur du four ont un très grand impact sur les choix des matériaux de construction.

Chapitre III

La chaleur dans les fours

I. Introduction

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

Lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un système ou lorsque deux systèmes à températures différentes sont mis en contact. On note une tendance à l'égalisation de température qui s'effectue de manière spontanée : on dit qu'il y a transfert thermique ou transfert de chaleur.

Donc, le transfert thermique se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Le transfert thermique obéit aux principes de la thermodynamique mais les lois de la thermodynamique ne suffisent pas pour décrire la manière avec laquelle se propage l'énergie thermique et expliquer ses mécanismes d'une part et prévoir la vitesse de propagation d'autre part. Le transfert thermique est donc régi par d'autres lois qui sont très importantes dans différentes branches de l'industrie : exemple les fours, les évaporateurs, les condenseurs et les séchoirs.

II. Transfert de chaleur

Les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs et les condenseurs, mais aussi pour des opérations de transformations chimiques [8].

De nos jours, par suite de l'accroissement relatif du prix de revient de l'énergie, on recherche dans tous les cas à obtenir le rendement maximal d'une installation pour une dépense d'énergie minimale.

Le potentiel qui provoque le transport et le transfert de l'énergie thermique est la température. Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons : conduction, convection et rayonnement.

II.1. Conduction

L'énergie peut être transférée par deux mécanismes physiques :

- Le transfert d'énergie cinétique (agitation moléculaire sous l'effet de la température) ;
- Le transfert d'électrons libres (cas des métaux).

Le transfert de chaleur uniquement par conduction à la charge est rare dans les fours industriels. Cela se produit lorsque le métal froid est posé sur un foyer chaud ou pendant une courte période, lorsqu'un morceau de métal est immergé dans un bain de sel ou dans un bain de métal. Si deux morceaux de matériau solide sont en contact étroit, les surfaces en contact prennent instantanément une température identique quelque part entre les températures des corps en contact. Les gradients de températures dans les matériaux en contact sont inversement proportionnels à leurs conductivités, comme indiqué dans la

Fig.III.1. Le flux de chaleur (débit de chaleur par unité de surface) ne dépend pas seulement des températures des deux corps mais aussi des diffusivités et des configurations du contact des corps [1,2,9].

La loi correspondante à ce mode de transfert de chaleur est :

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla}T \quad (\text{Loi de Fourier}) \dots\dots\dots \text{III.1}$$

Où :

q : la densité de flux de chaleur ;

T : la température absolue ;

λ : la conductivité thermique [kcal/h.m.°C]ou [w/m.K (SI)].

λ est fonction de la composition chimique du milieu, de son état physique, sa température et de sa pression. Pour les solides la dépendance de la pression est négligeable. En fonction de la température λ évolue généralement d'une manière linéaire sous forme :

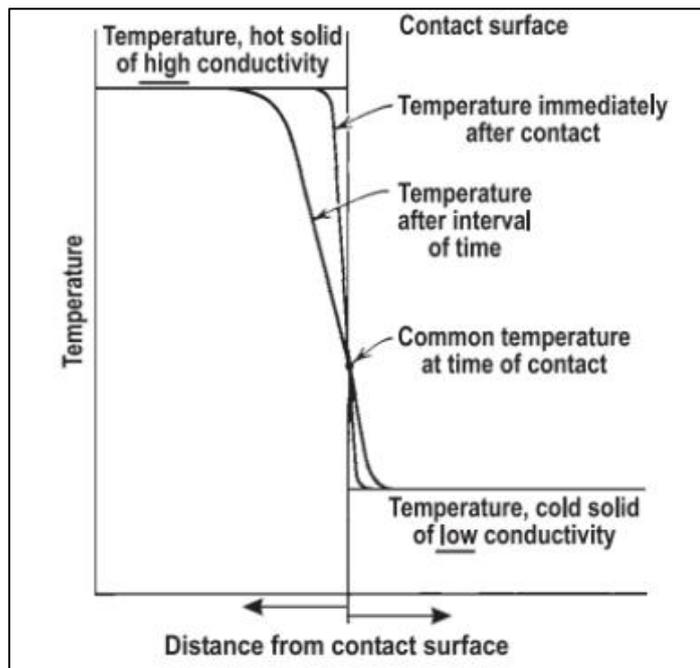


Fig. III.1: Effet de la conductivité et le temps sur le gradient de la température pour deux solides de températures et conductivité différentes [2]

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta T) \dots\dots\dots \text{III.2}$$

II.2. Convection

Le transfert de chaleur par convection est attribuable au mouvement macroscopique d'un fluide. Il est donc confiné aux liquides et aux gaz (physiquement transportant des molécules chauffées (ou refroidies) vers une autre surface) [1,2].

On distingue deux types de convection :

- Convection naturelle ou libre : c'est le mouvement du fluide résulte de la différence de densité entre la partie chaude et la partie froide de ce fluide.
- Convection forcée : c'est un mouvement du fluide produit par une action extérieure (pompe et ventilateur) [1,2].

Elle est alors un mode de transfert d'énergie sous l'action combiné de la conduction et du mouvement du milieu (c'est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre un solide et un fluide) [2].

La loi correspondante à ce mode de transfert de chaleur est :

$$q = h_c \Delta T = h_c (T_s - T_f) \dots \dots \dots \text{III.3}$$

Où :

q : densité de flux de chaleur ;

h_c : coefficient d'échange de chaleur par convection [Kcal/h.m².°C] ou [w/m²K (SI)] ;

T_s : Température de la surface du solide ;

T_f : Température du fluide.

II.3. Rayonnement

Lorsque deux surfaces solides ont des températures différentes et sont séparées par une phase fluide transparente, elles échangeront de l'énergie thermique par rayonnement. Ce dernier est constitué d'ondes électromagnétiques du même caractère que la lumière visible, son intensité et sa visibilité dues au spectre de longueur d'onde augmentent avec la température de la surface rayonnante. Lorsque le rayonnement tombe sur une surface, il peut être réfléchi, transmis ou absorbé. La fraction d'énergie est absorbée et manifestée sous forme de chaleur. Donc une quantité nette d'énergie s'écoule de la surface plus chaude à la surface plus froide [1].

Particulièrement à températures élevées, ce type d'échange de chaleur dépasse souvent le conducteur ou le transport convectif et devient le processus de contrôle. Dans la plupart des fours à haute température fonctionnant à plus de 1000°C, environ de 90% du transfert de chaleur est radiatif tandis que l'équilibre est convectif [1].

Les lois physiques régissant le rayonnement thermique sont bien établies mais sont insuffisants pour décrire quantitativement les processus techniques. Ceci est largement dû à la structure et au comportement thermique des surfaces réelles par opposition aux surfaces idéales (détermination des émissivités), ainsi que l'interaction entre différentes surfaces et corps d'orientation plus ou moins compliquée dans l'espace [1].

Les solides rayonnent la chaleur, même à basse température. La chaleur radiante nette effectivement transférée à un récepteur est la différence entre la chaleur radiante reçue d'une source et la chaleur radiante réémise du récepteur à la source. Le flux net de

chaleur radiante entre un corps chaud (source de chaleur) et un corps plus froid (récepteur de chaleur) peut être calculé par l'une des équations de Stefan-Boltzmann [2].

$$M^{\circ} = \sigma T^4 \dots\dots\dots \text{III.4}$$

Où :

M° : l'émittence ;

σ : constante de Stefan-Boltzmann ;

T : Température absolue.

III. Chauffage des fours

Le chauffage des fours peut se faire selon deux façons, électriquement ou par combustible.

III.1. Chauffage électrique

La principale source d'énergie pour le chauffage dans ce cas est l'électricité. Il existe un certain nombre de méthodes utilisées pour livrer l'énergie électrique à la matière, les principales parmi ceux-ci étant [1] :

- Chauffage par résistance ;
- Chauffage à l'arc ;
- Chauffage par induction ;
- Chauffage diélectrique.

a. Chauffage par résistance :

Le passage de l'électricité à travers un matériau conducteur donne lieu à la génération de chaleur dans le matériau en raison de sa résistance électrique. La puissance développée est donnée par la formule :

$$\text{puissance développée} = R I^2 \text{ (watts) } \dots\dots \text{III.5}$$

Où :

I : le courant (ampères) ;

R : la résistance (ohms).

La résistance d'un conducteur est donnée par:

$$R = \Omega \frac{x}{A} \dots\dots\dots \text{III.6}$$

Où :

Ω : la résistivité du matériau ;

x : la longueur du matériau ;

A : la section du matériau.

La plupart des matériaux, solides, liquides et gazeux, conduisent l'électricité, mais la valeur de Ω varie d'environ trois ordres de grandeur en fonction des propriétés du matériau et de la température. La résistivité des métaux augmente avec la température, alors qu'elle peut diminuer pour les matériaux non métalliques. Si le matériau présente une variation uniforme, alors la relation de température est de la forme :

$$\Omega_T = \Omega_0 (1 + \alpha T) \dots \dots \dots \text{III.7}$$

Le chauffage par résistance peut être utilisé pour chauffer le matériau directement, ou peut être utilisé pour chauffer un conducteur séparé ou un élément chauffant, qui chauffe le matériau par une combinaison de conduction, de convection et de rayonnement [1].

b. Chauffage à l'arc

Les arcs électriques sont généralement connus en ingénierie à cause de leur utilisation répandue dans le soudage. Le principe d'un arc, c'est qu'il est composé de gaz à une température élevés (typiquement 6000°C) ce qui rend la zone de travail hautement ionisées. Les températures extrêmement élevées atteinte dans un arc permettent des taux de transfert de chaleur très élevés. Il y a deux types de base de systèmes de chauffage à l'arc, ceux avec des électrodes, et d'autres sans électrodes [1].

c. Chauffage par induction

Le chauffage par induction se produit dans tout système de transformateur, c'est-à-dire lorsque l'enroulement primaire induit un courant dans un enroulement secondaire. Si une pièce conductrice remplace l'enroulement secondaire, un chauffage rapide et contrôlé peut être atteint [1].

d. chauffage diélectrique

Quand un champ électrique est appliqué à un diélectrique, le matériau devient polarisé. Si le champ est inversé, les charges de polarisation inversent leurs positions. Ainsi, si le champ oscille, la polarisation des charges oscille et il en résulte un courant alternatif. Cet effet est particulièrement fort dans les matériaux avec un dipôle. Le taux de chauffage par unité de volume [1], Q_v est donné par :

$$Q_v = 2\pi f \omega_0 \omega_r'' E^2 \dots \dots \dots \text{III.8}$$

Où :

- E : Intensité du champ de crête locale V / m ;
- ω_0 : Permittivité de l'espace libre (8.85×10^{-12} F/m) ;
- ω_r'' : Facteur de perte diélectrique.

III.2. Chauffage par combustible

Le choix du combustible est une décision cruciale dans le processus de conception du four, parce que le carburant est l'un des éléments les plus réponsus dans le fonctionnement ultérieur du four. Le choix du combustible a également un impact majeur sur la performance du four et le coût de l'installation globale. Il devrait être noté qu'un

carburant qui a une approche idéale pour un processus peut être moins approprié ou même complètement inacceptable pour un système différent. Les facteurs influant sur le coût du carburant pour l'utilisateur comprennent : l'abondance ou la rareté, la facilité d'extraction ou de fabrication, la facilité d'utilisation et la facilité de transport [10].

Les carburants peuvent être des solides, des liquides ou des gaz et peuvent se produire naturellement ou être fabriqués. Les carburants naturels nécessitent généralement un traitement avant l'utilisation [10].

a. Les combustibles solides

Les premiers fours ont été mis à feu en utilisant des combustibles solides et ils sont encore un combustible important pour de nombreux processus, tels que les hauts fourneaux et la fabrication de ciment [10].

Les combustibles solides sont eux même représenté par [10] :

- Le bois :

C'est un combustible relativement cher, demande beaucoup de main d'œuvre et produits des quantités appréciable de cendres qui peuvent cependant être employés comme engrais, du fait de leur richesse en potassium.

Il est utilisé soit sous forme de morceaux crus ou sous forme carbonisé, soit même en aggloméré.

- Les houilles :

Il existe une grande variété qui sont mises en œuvre soit sous forme de block plus ou moins volumineux, soit pulvérisées avant d'être envoyé dans les brûleurs spéciaux.

Les fines de houilles sont parfois liées entre elles à l'aide de brais pour constitués des agglomérés, afin d'obtenir des semi-cokes.

Les combustibles solides donnent toute sécurité au stockage et leur mise en œuvre ne présente aucun danger pour le personnel des chaufferies, à la condition de prendre certain précaution.

b. Les combustibles liquides

La plupart des combustibles liquides sont à base de pétrole, bien que dans le passé les combustibles liquides ont été produits à partir de goudrons de charbon qui étaient un sous-produit des usines de gazéification du charbon, mais ces carburants sont de nos jours rarement disponibles.

Les carburants pétroliers sont produits par le raffinage du pétrole brut. L'huile lubrifiante résiduelle est actuellement utilisée comme carburant supplémentaire, mais les approvisionnements sont limités. Les combustibles pétroliers sont classés comme les carburants distillés, tels que le kérosène et le diesel ou les carburants résiduels. Ces derniers viennent dans une gamme de viscosités et sont classés différemment dans différents pays [10].

c. Les combustibles gazeux

Ils représentent la forme la plus évoluée des combustibles, du fait qu'ils ne laissent aucun résidu de combustion mais ils coûtent relativement cher et la sécurité d'emploi est loin d'être totalement assurée (risque d'asphyxie, intoxication du personnel).

Les gaz peuvent être à l'état naturel ou produit, généralement à partir de pétrole, charbon ou biomasse (bois). Les combustibles naturels et produits varient largement dans la composition chimique et les caractéristiques physiques. Les gaz produits, étaient dominants dans le monde industriel, ont perdu du terrain face à l'utilisation massive du gaz naturel, d'abord aux États-Unis et au Canada, puis à la fin des années 1960 en Australie et en Europe suite à des découvertes de gaz naturel [10].

IV. Conclusion

Le transfert de chaleur dans un four rotatif est un phénomène relativement complexe. Il dépend essentiellement du diamètre et de la vitesse de rotation du tambour et de la taille des particules, les propriétés thermo physiques et le comportement de mouvement du solide.

Chapitre IV

Les mouvements de
la charge et le
rendement du four

I. Introduction

Le mouvement de la charge dans un four tournant varie selon plusieurs paramètres qui déterminent un mouvement donné de la charge. Les expériences effectuées sur différents matériaux, montre qu'on peut classer ces mouvements en six catégories, et sont déterminés sur la Fig. IV.1, ces cas de figure se présentent comme suit :

- Le glissement ;
- Le régime d'avalanche ;
- Le roulement ;
- La cascade ;
- La cataracte ;
- La centrifugation.

Il est bien entendu que le comportement possible dépend des caractéristiques des particules qui composent la charge, du diamètre du tube, de la vitesse de rotation, de la profondeur du lit et du frottement paroi/charge.

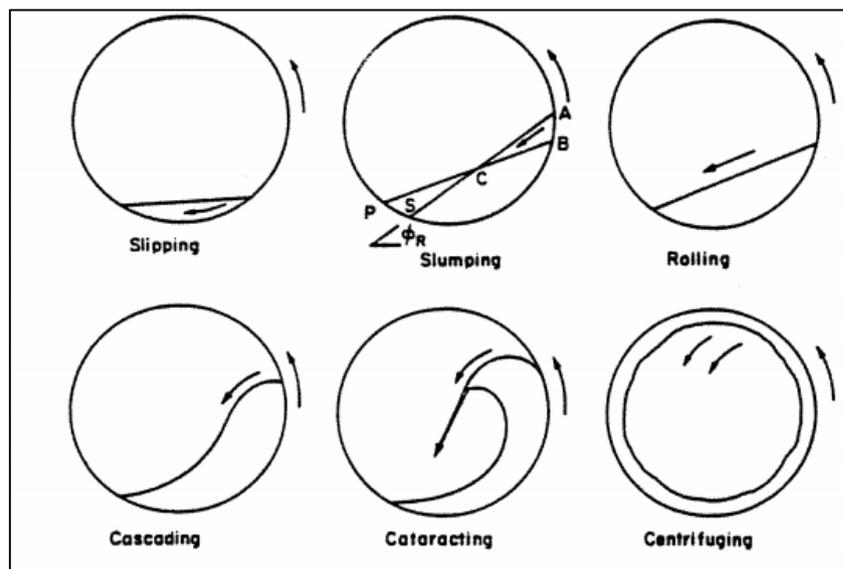


Fig. IV.1 : Les différents mouvements transversaux de la charge [13].

II. Les différents types de comportement de la charge

Lorsqu'un matériau granulaire est chargé dans un tube tournant, le mouvement d'ensemble des grains, vu dans une section transversale, peut varier en fonction des conditions expérimentales.

Des expériences sont faites pour différents matériaux (sable, calcaire et oxyde de fer, gravier). Le matériel expérimental comprend un four pilote (5,5m de long ; \emptyset intérieur 0,4m), et des cylindres de laboratoire (maquettes froides) (0,5m <longueur< 1 m ; 0,4m < \emptyset intérieur< 1m). Les résultats ont donné une classification très précise du mouvement transversal et ont montré que les paramètres qui déterminent ce mouvement sont [13] :

Les mouvements de la charge et le rendement du four

- le diamètre du tube ;
- la vitesse de rotation ;
- la profondeur du lit ;
- les caractéristiques des particules, qui sont essentiellement leur taille et leur forme ;
- le frottement paroi/charge.

II.1. Le glissement (slipping)

Il se produit quand le frottement paroi/charge est faible, quels que soient les autres paramètres. La charge glisse sur la paroi et se comporte comme un solide indéformable où les grains ne bougent pas les uns par rapport aux autres. Si le frottement est très faible, le glissement peut être continu ; la charge reste à peu près immobile. Lorsque le frottement est un peu plus élevé on assiste à un va-et-vient périodique ; le tube entraîne la charge dans son mouvement de rotation, jusqu'au moment où la gravité l'emporte sur les forces de frottement, et la charge redescend en glissant le long de la paroi.

Le brassage de la charge est dans cette situation, réduit à néant, et les échanges thermiques sont très médiocres. Le glissement est donc à éviter. Pour cela, il faut augmenter la force de frottement paroi/charge, en augmentant soit le coefficient de frottement (rugosité de la paroi), soit la composante normale (en chargeant davantage le four) [13].

II.2. Le régime d'avalanches (slumping)

Lorsque le glissement n'est pas possible (frottement paroi/charge suffisant), on observe, aux faibles vitesses de rotation, un mouvement alternatif. Périodiquement, une partie de charge, située au sommet du talus, se détache de la masse et dévale la pente pour se retrouver en bas du talus. La charge reste ensuite solidaire du tube dans son mouvement de rotation, jusqu'à ce qu'une nouvelle avalanche se produise [13].

II.3. Le roulement (rolling)

Lorsque la vitesse de rotation augmente, le régime d'avalanches fait place progressivement au roulement. On observe alors un mouvement continu d'une partie de la charge sur la surface du lit (seulement une couche relativement mince participe à ce roulement en surface, le reste de la charge est totalement lié au tube) [13].

Les caractéristiques de ce type de mouvement sont :

- l'angle d'inclinaison du talus, qui reste constant et ne dépend que des particules ;
- l'épaisseur de la couche superficielle qui roule sur la charge ; elle augmente avec le diamètre des grains, la vitesse de rotation et la hauteur totale de la charge.

Le passage du régime d'avalanches au roulement se produit quand le temps nécessaire pour renouveler la partie supérieure du talus devient égal à la durée d'une avalanche. Cela explique que la transition soit favorisée quand :

- le taux de remplissage est élevé ;
- les grains ont une bonne aptitude au roulement. C'est le cas pour des petites particules et sensiblement sphériques ;

- le diamètre du tube est grand.

II.4. Cascade, cataracte, centrifugation

Pour des vitesses de rotations encore plus élevées, les particules situées au sommet du talus ont une vitesse qui leur permet de décoller légèrement de la surface. La section transversale de la charge adopte alors une forme de haricot : ce mouvement a été nommé cascade [13].

Entre la cascade et la centrifugation, il existe un autre type de mouvement : la cataracte.

La centrifugation se produit quand la force d'inertie compense le poids, soit

$$n \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{D}}$$

Où :

n : représente la vitesse de rotation (tour.min-1),

g : l'accélération de la pesanteur (m².s-1),

D : le diamètre intérieur du tube (m).

Les fines particules ont leur centre de gravité plus proche de la paroi, donc centrifugent pour des vitesses de rotation plus faibles que les grosses particules, et se concentrent contre la paroi du tube. La cataracte montre déjà ce type de ségrégation. Par conséquent, c'est la cascade, intermédiaire entre le roulement et la cataracte, qui donne un brassage parfait, quelle que soit la distribution granulométrique [13].

III. Trajectoire d'un grain au sein de la charge

Les expériences ont montré qu'en régimes d'avalanches et de roulement, la majeure partie de la charge a un mouvement de rotation solidaire du tube, et qu'une couche de grains roule sur la charge [13].

Il existe un gradient de vitesse dans la couche superficielle. Un grain, au cours de ses passages successifs en surface et dans la charge, suit des trajectoires différentes et ne peut conserver la même position pendant plus de deux ou trois tours [13].

L'épaisseur de la couche superficielle est négligeable devant la hauteur totale de la charge, aussi le temps de passage des grains dans cette couche est également négligeable devant leur temps de passage dans la zone inférieure [13].

IV. Rendement du four

L'équilibre thermique nous aide à comprendre numériquement la perte de la chaleur et l'efficacité actuelles et à améliorer le fonctionnement du four en utilisant ces données. Ainsi, l'équilibre thermique est une condition préalable pour évaluer le potentiel de conservation de l'énergie [12].

Les pertes de la chaleur à travers les parois du four dépendent de l'épaisseur et de la matière du garnissage réfractaire isolant. Toutefois, pour un garnissage isolant économiquement optimum, ces pertes sont faibles [12].

IV.1. Calcul du Rendement

Ce qui nous intéresse au premier chef est le rendement global de l'opération de chauffage, lequel correspond au rapport :

$$R_g = \frac{\text{chaleur effectivement utilisée}}{\text{chaleur dans le combustible}} = \frac{Q_u}{Q_{fo}} \dots\dots\dots\text{IV.1}$$

Qui peut lui-même se décomposer en deux éléments :

$$R_g = R_i \cdot R_e \dots\dots\dots\text{IV.2}$$

R_i ou rendement interne caractérise la quantité de la combustion ainsi que l'efficacité du transfert de chaleur entre la flamme et les produits de la combustion d'une part, et la matière à chauffée d'autre part [10].

R_e ou rendement externe correspond particulièrement à l'appareil chauffée c.-à-d. sa constitution, à son calorifugeage, et à son mode d'exploitation, mais il faut également tenir compte des canalisations de liaison, lorsqu'elle existe (cas des transports de chaleur par fluide caloporteur) [10].

IV.2. Les pertes dans les fours

Les différentes pertes qui se produisent dans le four à combustible sont énumérées ci-dessous [12].

- 1- Chaleur perdue à travers les gaz d'échappement soit comme chaleur sensible, chaleur latente ou la combustion incomplète ;
- 2- Perte de chaleur à travers les parois du four et le foyer ;
- 3- Perte de chaleur dans l'environnement par rayonnement et convection provenant de la surface extérieure des murs ;
- 4- Perte de chaleur à travers les fuites de gaz (les fissures, les ouvertures et les portes).

IV.3. Efficacité du four

L'efficacité d'un four est le rapport de la production utile à la chaleur de contribution. Elle peut être déterminée soit directement ou indirectement [14].

a- Méthode directe

L'efficacité du four peut être calculée en mesurant la quantité de carburant consommée par unité de poids de la matière produite par la fournaise.

$$\text{Efficacité thermique du four} = \frac{\text{Chaleur dans le carburant consommé}}{\text{Chaleur dans le stock}} \dots\dots\dots\text{IV.3}$$

La quantité de chaleur à communiquer (Q) au stock peut être trouvée à partir de la formule :

$$Q = m \times C_p (t_2 - t_1) \dots\dots\dots\text{IV.4}$$

Les mouvements de la charge et le rendement du four

Où :

Q : Quantité de chaleur [kcal] ;

m : Poids du matériau [kg] ;

C_p : Chaleur spécifique moyenne [kCal / kg °C] ;

t_2 : Température finale souhaitée [°C] ;

t_1 : Température initiale de la charge avant son entrée dans le four [°C].

b- Méthode indirecte

L'efficacité du four peut également être calculée par méthode indirecte. Elle est calculée en soustrayant la perte de chaleur sensible dans les gaz de combustion, la perte due à l'humidité dans les gaz de combustion, la perte de chaleur due aux ouvertures dans le four, la perte de chaleur à travers la peau du four et d'autres pertes non comptabilisées provenant de l'entrée dans le four.

Afin de déterminer l'efficacité du four en utilisant la méthode indirecte, il existe des différents paramètres requis qui sont la consommation du combustible du four, la production de matériaux, la quantité d'air excédentaire, la température des gaz de combustion, de la température du four à différentes zones, de la température de la peau et de la température de l'air de combustion chaud. L'efficacité est déterminée en soustrayant toutes les pertes de chaleur de 100 [14].

IV.4. Facteurs influant sur la performance du four

Les facteurs importants qui influent sur l'efficacité sont énumérés ci-dessous [14].

- Mauvaise conception ;
- Utilisation d'un brûleur inefficace ;
- Absence de récupération de chaleur résiduelle ;
- Absence d'instruments ou de contrôles ;
- Mauvaise opération ou maintenance ;
- Mauvaise isolation (Réfractaires).

V. Conclusion

Il est très difficile de prévoir le profil de chargement de la charge dans un four, car il est nécessaire de connaître la trajectoire précise des grains pour pouvoir déterminer le débit de solide dans chaque section du four.

Le rendement de la charge a un impact énorme sur la rentabilité des fours. Ce rendement doit être déjà pris en compte au stade de la conception. Il est très important d'améliorer le rendement pour réduire la consommation d'énergie et de combustible et donc réduire le coût de production.

Partie expérimentale

Chapitre V

Design et choix des matériaux

I. Introduction

Afin de réaliser le système de rotation d'un four rotatif de réduction directe, nous avons commencé notre travail par faire un design explicatif du système puis à partir de là nous avons déterminé les différentes propriétés exigées de chaque matériau utilisé.

II. Design du système et matériaux utilisés

Avant de réaliser le système de rotation du four à réduction directe, nous avons commencé par dessiner ce système avec des logiciels (AutoCAD et ArchiCAD) ce qui nous a donné la figure suivante :

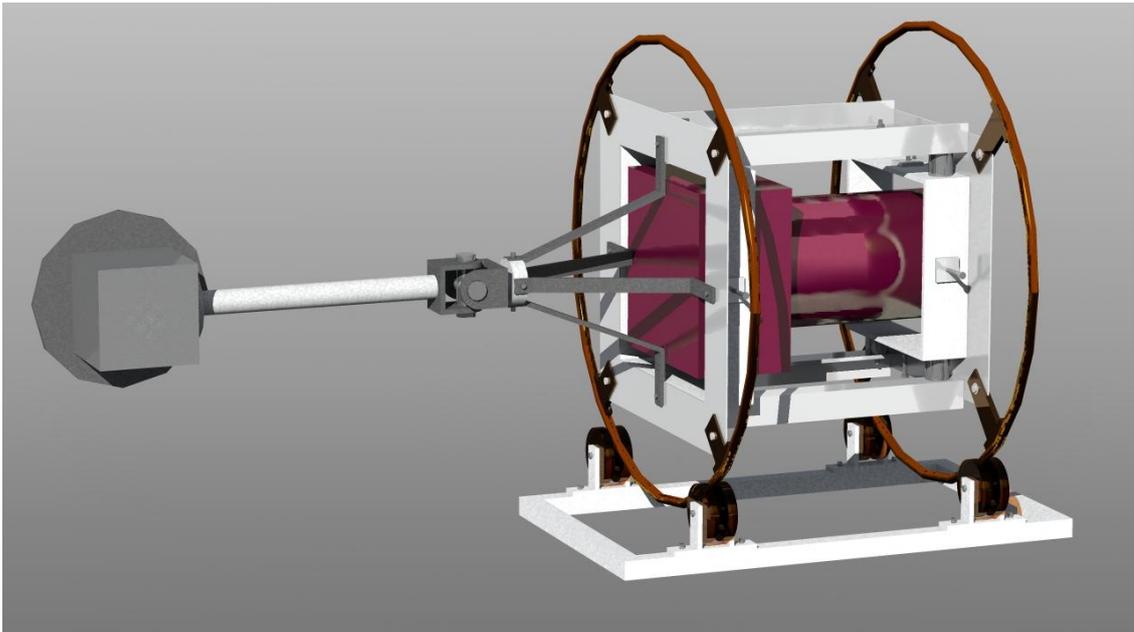


Fig. V.1: design du système rotatif du four.

Ce système est composé de deux parties, partie A et partie B, comme le montre la Fig. V.2.

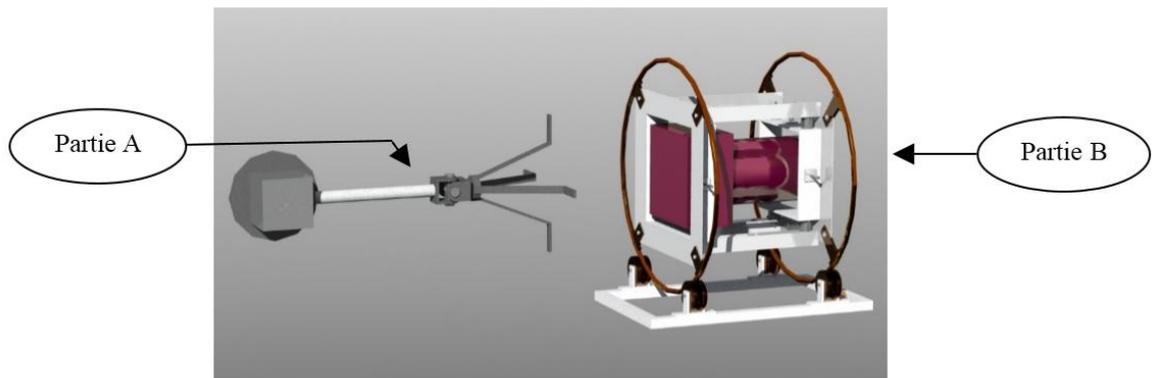


Fig. V.2: les deux parties constituant le système de rotation du four.

- La partie A : elle-même est constituée de plusieurs composants (Fig. V.3).

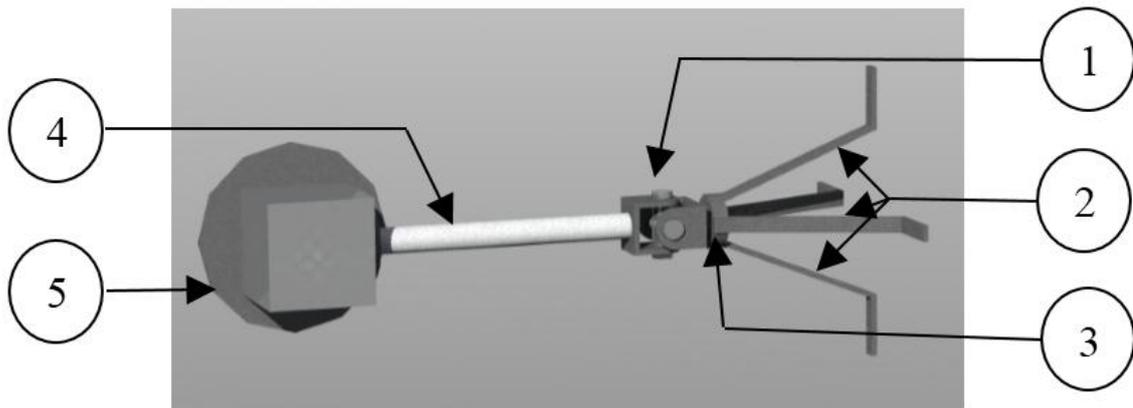


Fig. V.3: les différents éléments constituant la partie A.

- 1- Un joint de carbon ;
- 2-Des fers plats ;
- 3-Une pièce de support des fers plats en acier soudée au joint de carbon ;
- 4-Un axe en acier pour transmettre le mouvement ;
- 5- Un réducteur de vitesse.

- La partie B (Fig. V.4).

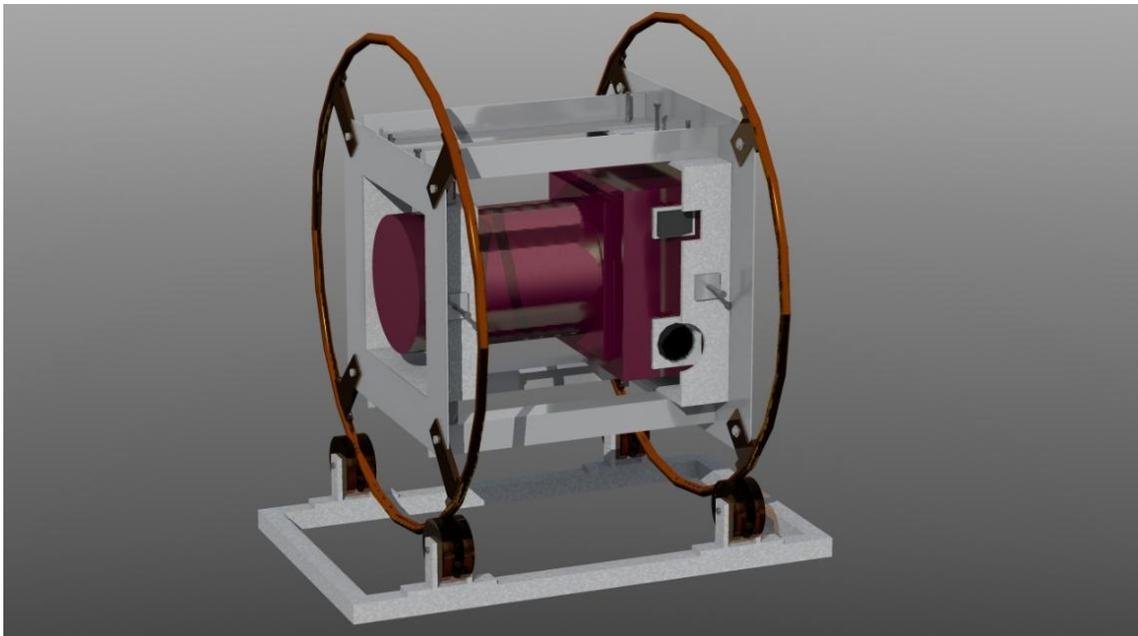


Fig. V.4: partie B du système rotatif du four.

Cette partie est constituée de deux autres parties B' et B'' (Fig. V.5).

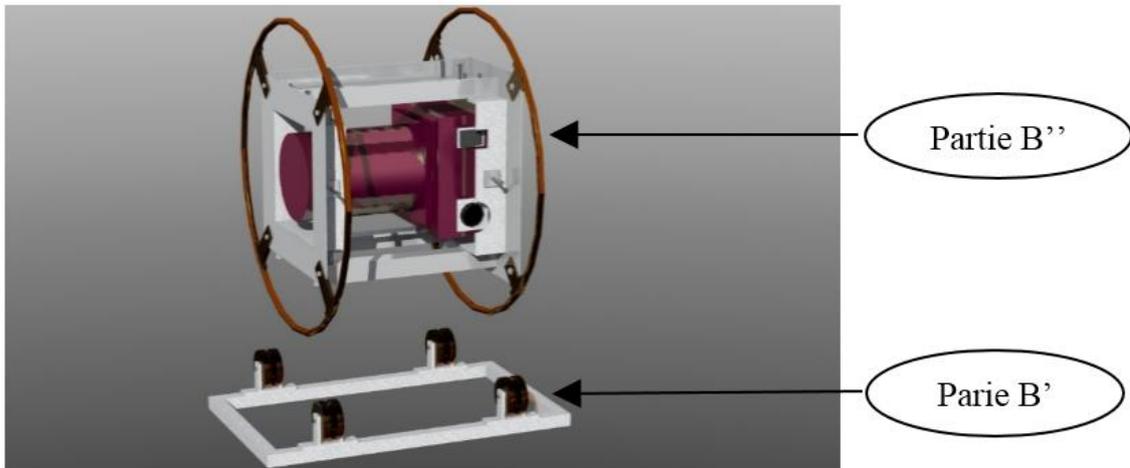


Fig. V.5: les deux ensembles constituant la partie B.

- Partie B' (Fig. V.6)

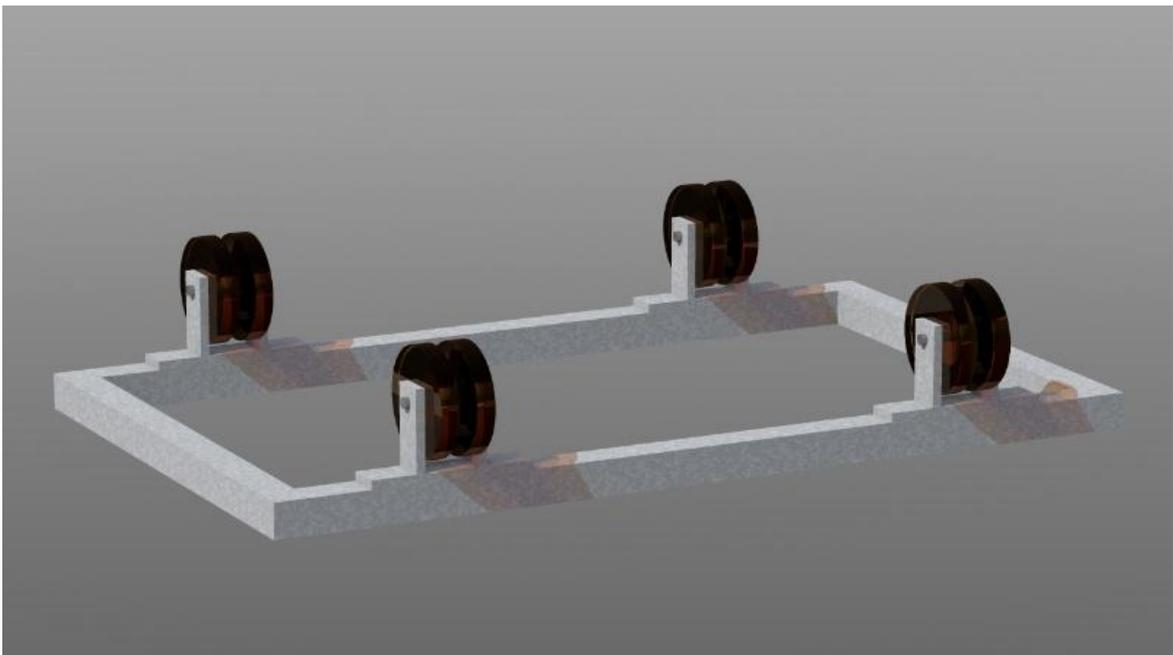


Fig. V.6 : partie B' du système rotatif.

Cette partie B' est constituée de plusieurs éléments (Fig. V.7).

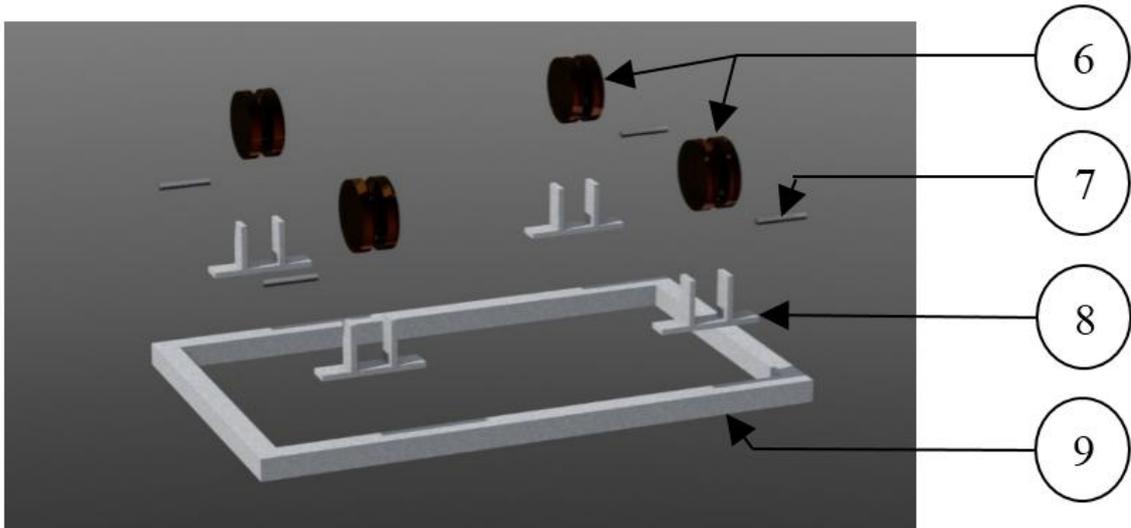


Fig. V.7 : les différents éléments de la partie B'.

6- Galets : Ils sont faits de deux pièces (Fig. V.8) ;

7- Axes de fixation en acier ;

8- Supports pour les galets en acier ;

9- Support pivotable du four en acier.

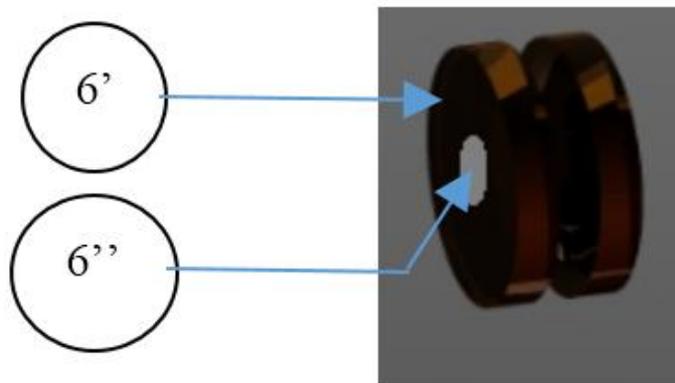


Fig. V.8: les composants des galets.

6'- Pièces cylindriques en acier ;

6''- Galets en résine centrés par des pièces en acier.

- Partie B'' (Fig. V.9).

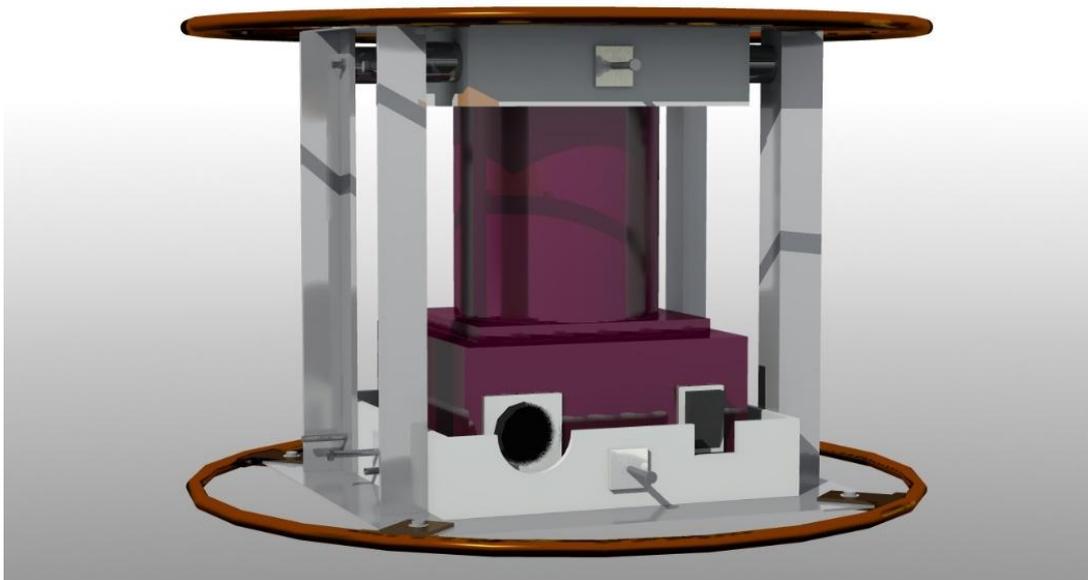


Fig. V.9 : design de la partie B'' du système rotatif.

Fig. V.10 montre les différents constituants de la partie B'' :

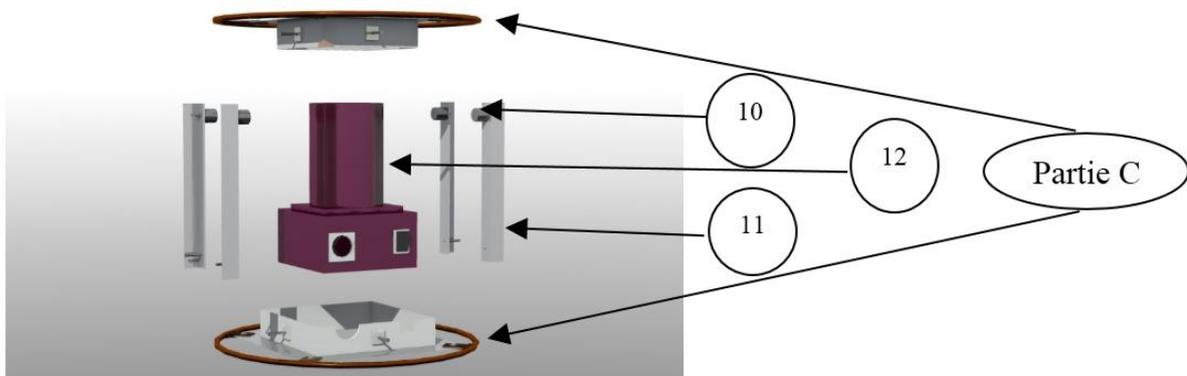


Fig. V.10: les différents constituants de la partie B''.

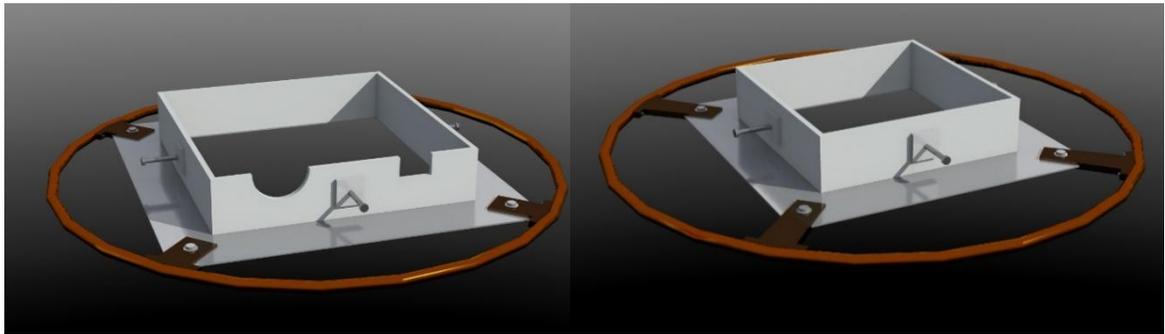
10- Des entretoises d'ajustement de distance en aluminium ;

11- Des cornières en aluminium pour le maintien de distance entre les deux cerceaux ;

12- Le four.

Design et choix des matériaux

La partie C : elle contient deux systèmes presque similaires pour fixer le four dedans, l'un pour fixer la base et l'autre pour fixer la partie supérieure du four (Fig. V.11)



a

b

Fig. V.11: la partie C du système rotatif :

a- partie inférieure

b- partie supérieure

La Fig. V.12 montre les différents constituants de la partie inférieure de l'ensemble C.

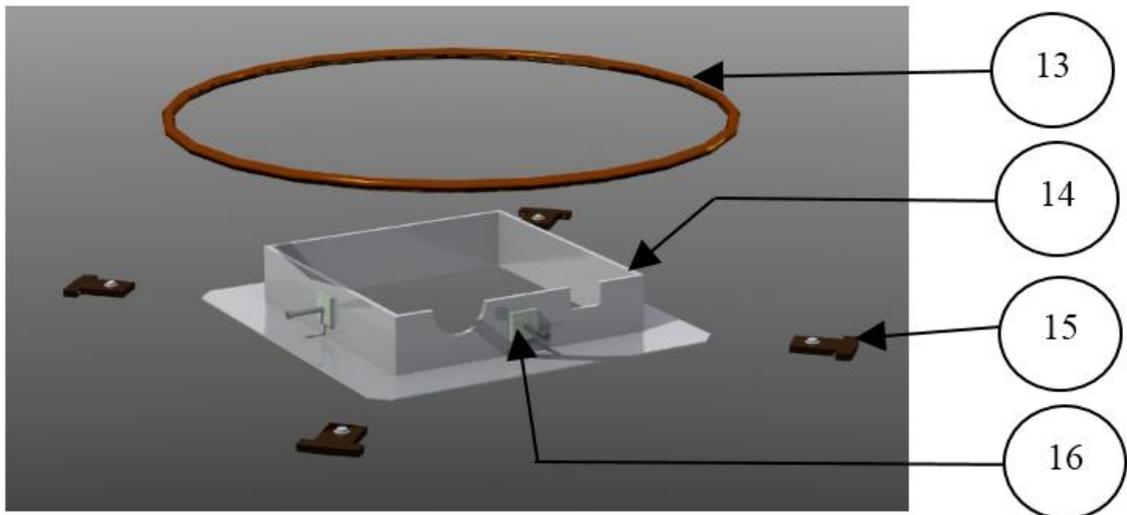


Fig. V.12: les différents constituants de la partie inférieure de l'ensemble C.

13- Cerceau en cuivre ;

14- Cadre en aluminium ;

15- Pièces en résine ;

16- Carreaux en aluminium pour le renfort.

III. Le choix du matériau

C'est la teneur en carbone qui détermine les propriétés mécaniques des aciers. Suivant cette teneur en carbone, on distingue les aciers doux et les aciers mi-durs. La teneur en carbone détermine également la soudabilité d'un métal. Plus la teneur en carbone d'un acier augmente, plus il est dur, plus son degré de soudabilité baisse.

L'aluminium, dont les ventes mondiales ne cessent de progresser depuis plus d'un siècle, il possède de nombreuses propriétés : légèreté ; presque trois fois plus léger que l'acier, avec une densité de 2.8 g.cm^{-3} , alors que les aciers ont une densité de 7.8 g.cm^{-3} . Il est très malléable, recyclable et résistant à la corrosion. Il est facilement usinable et ductile.

Les matériaux utilisés lors de la réalisation du système de rotation du four :

1- Un joint de cardon

Il est composé de deux parties : deux fers plats (de dureté d'environ 261 Hv) en forme de U et un croisillon en acier (de dureté d'environ 497 Hv), dont les compositions chimiques sont données dans les tableaux (V.1 et V.2) suivants.

Tableau V.1 : composition chimique du fer plat du joint de cardon :

L'élément	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Teneur(%)	97.9	0.144	0.124	0.551	0.062	0.045	0.102	0.055

Ni	Co	Cu	Sn
0.188	0.014	0.653	0.044

Tableau V.2 : composition chimique du croisillon du joint de cardon :

L'élément	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Teneur(%)	97.2	1.45	0.280	0.334	0.026	0.017	0.531	0.017

Ni	Al	Co	Cu	V
0.023	0.011	0.007	0.049	0.002

L'emplacement et le fonctionnement du joint de cardon dans le système rotatif exige les propriétés suivantes :

- L'élasticité : qui est la faculté de subir une déformation temporaire sous l'action d'un effort approprié et revenir aux dimensions initiales après la suppression de cette action ;
- Résistance à la torsion ;
- Résistance à la fatigue ;
- Résistance à l'usure ;
- L'usinabilité ;
- La soudabilité.

Design et choix des matériaux

4-Trois axes en acier pour transmettre le mouvement (entre le réducteur de vitesse et le joint de cardon, le réducteur de vitesse et l'accouplement, l'accouplement et le moteur) avec une dureté de 216 Hv, dont la composition chimique est donnée dans le tableau (V.3) qui suit.

Tableau V.3 : composition chimique des axes de transmission du mouvement :

Elément	Fe	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Co
Teneur (%)	99.1	0.047	0.397	0.118	0.06	0.03	0.036	0.015

Cu	V	Sn
0.09	0.055	0.013

L'emplacement et le fonctionnement des axes de transmission de mouvement dans le système rotatif exigent les propriétés suivantes :

- L'élasticité : qui est la faculté de subir une déformation temporaire sous l'action d'un effort approprié et revenir aux dimensions initiales après la suppression de cette action ;
- Résistance à la fatigue ;
- Résistance à la torsion ;
- Résistance à l'usure ;
- Résistance à la rupture ;
- L'usinabilité.

6'- Des pièces cylindriques en acier (dureté de 139.5 Hv), dont la composition chimique est donnée dans le tableau (V.4) qui suit.

Tableau V.4 : composition chimique des pièces cylindrique des centres des galets :

L'élément	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Teneur(%)	99.3	0.044	0.006	0.405	0.032	0.022	0.018	0.003

Ni	Al	Co	Cu	V
0.05	0.002	0.017	0.028	0.002

L'emplacement et le fonctionnement des cylindres des galets dans le système rotatif exigent les propriétés suivantes :

- La résistance à l'usure ;
- L'usinabilité.

7-Des axes de fixation des galets en acier (dureté de 252 Hv), dont la composition chimique est donnée dans le tableau (V.5) qui suit.

Design et choix des matériaux

Tableau V.5 : composition chimique des axes de fixation des galets sur leurs supports :

L'élément	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	V	Sn
Teneur(%)	98.7	0.205	0.158	0.734	0.073	0.038	0.013	0.017	0.004	0.10

L'emplacement et le fonctionnement des axes de fixation des galets dans le système rotatif exigent les propriétés suivantes :

- Résistance à l'usure ;
- Résistance à la torsion ;
- Résistance au cisaillement ;
- L'usinabilité .

8- Des supports pour les galets en acier (dureté de 308 Hv), dont la composition chimique est donnée dans le tableau (V.6) qui suit.

Tableau V.6 : composition chimique des supports des galets :

L'élément	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Teneur(%)	99	0.034	0.115	0.663	0.005	0.005	0.023	0.003

Ni	Al	Co	Cu	V
0.012	0.008	0.010	0.011	0.006

L'emplacement et le fonctionnement des supports des galets dans le système rotatif exigent les propriétés suivantes :

- Résistance à l'usure ;
- La soudabilité.

9-Un support pivotable du four en acier (dureté de 173 Hv), dont la composition chimique est donnée dans le tableau (V.7) qui suit.

Tableau V.7 : composition chimique du support pivotable du four :

L'élément	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Sn
Teneur(%)	99	0.192	0.054	0.528	0.048	0.024	0.018	0.016	0.027	0.007

L'emplacement et le fonctionnement du support pivotable dans le système rotatif exige les propriétés suivantes :

- Supporter le poids du four ;
- La soudabilité.

10- Des entretoises d'ajustement de distance en aluminium (dureté de 115Hv), dont la composition chimique est donnée dans le tableau (V.8) qui suit.

Tableau V.8 : composition chimique des entretoises d'ajustement de distance :

L'élément	Al	Cu	Si	Mg	Mn	Fe
Teneur(%)	93.91	3.83	0.60	0.58	0.541	0.277

L'emplacement et le fonctionnement des entretoises d'ajustement dans le système rotatif exigent les propriétés suivantes :

- La légèreté.

11-Des cornières en aluminium pour le maintien de distance entre les deux cerceaux (dureté de 79Hv), dont la composition chimique est donnée dans le tableau (V.9) qui suit.

Tableau V.9 : composition chimique des cornières de maintien de la distance entre les cerceaux :

L'élément	Al	Si	Fe	Ti	Mn
Teneur(%)	98.59	1.07	0.215	0.034	0.032

L'emplacement et le fonctionnement des cornières de maintien dans le système rotatif exigent les propriétés suivantes :

- La légèreté.

14-Cadre en aluminium (dureté de 47 Hv selon l'épaisseur et 36Hv selon la surface), dont leurs composition chimique est donnée dans le tableau (V.10) qui suit.

Tableau V.10 : composition chimique des deux cadres d'aluminium :

L'élément	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ni
Teneur(%)	98.4	0.416	0.290	0.174	0.561	0.030	0.008

L'emplacement et le fonctionnement des cadres dans le système rotatif exige les propriétés suivantes :

- La légèreté ;
- Supporter la charge.

16-Des carreaux en aluminium pour le renfort (dureté de 38 Hv selon l'épaisseur et 39 Hv selon la surface), dont la composition chimique est donnée dans le tableau (V.11) qui suit.

Tableau V.11 : composition chimique des carreaux pour le renfort :

L'élément	Al	Si	Fe	Zn	Mn	Ni
Teneur(%)	98.76	0.64	0.565	0.0095	0.009	0.0033

L'emplacement et le fonctionnement des carreaux dans le système rotatif exigent les propriétés suivantes :

- La légèreté ;
- La faible résistance à la déformation ;
- La soudabilité ;
- La compatibilité avec le cadre en aluminium ;

- l'usinabilité.

De plus nous avons fabriqué une structure prismatique pour porter le moteur et le réducteur. Cette structure est faite à base d'acier (de dureté de 135 Hv pour le profilé et 153 Hv pour la cornière), dont les compositions chimiques sont données dans les tableaux (V.12 et V.13) suivants (Fig. V.13).

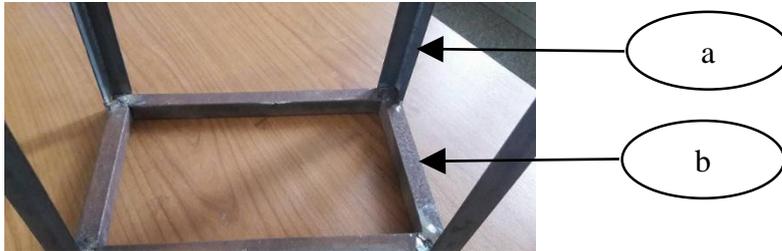


Fig. V.13 : structure prismatique porteuse du réducteur et du moteur.

Tableau V.12 : composition chimique de la cornière d'acier "a" :

L'élément	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
teneur(%)	98.1	0.172	0.19	0.598	0.077	0.041	0.101	0.023

Ni	Al	Co	Cu	V
0.115	0.003	0.011	0.462	0.004

Tableau V.13 : composition chimique du profilé d'acier "b" :

L'élément	Fe	C	Mo	P	S	Cr	Ni	Al
Teneur(%)	99.4	0.049	0.265	0.056	0.027	0.014	0.009	0.042

Cu	Sn	V
0.038	0.006	0.002

L'emplacement et le fonctionnement de la structure prismatique dans le système rotatif exigent les propriétés suivantes :

- Supporter le poids du moteur et du réducteur ;
- La soudabilité.

IV. Conclusion

Après la réalisation du design et la décision des choix des matériaux à utiliser, nous passerons à la deuxième étape qui est la réalisation du système.

Chapitre VI

La réalisation

I. Introduction

Après avoir choisis les matériaux, nous avons commencé notre travail de réalisation par usinage et soudage des différents composants entrant dans la conception du four. Toutes ces étapes ont été réalisées dans l'atelier du département mécanique qui possède les différents équipements essentiels pour notre réalisation.

II. Fabrication d'un dispositif qui maintient le four

Pour la fabrication du dispositif nous avons suivi les étapes suivantes :

a- brasage et façonnage des tubes en cuivre pour fabriquer les deux cerceaux (figVI.1) :

Le diamètre de tube est de 14mm et le cerceau est de diamètre de 470mm.



Fig.VI.1: un cerceau en tube de cuivre, cintré et brasé.

b- Moulages des pièces en résines :

Pour fabriquer la pièce en résine montrée ci-dessous, nous avons fabriqué un moule en bois dont la forme est montrée dans la figure ci-dessous. Cette forme est conçue de façon à épouser la forme circulaire du cerceau en cuivre. Après coulée, solidification de la résine et démoulage nous obtenons les pièces montrées en FigVI.2.



a



b

Fig.VI.2 : (a) moule en bois - (b) pièce en résine.

c- Découpages des cornières en aluminium puis le soudage des deux cadres :

Nous avons découpé une cornière en aluminium en petites cornières de différentes dimensions (180mm, 280mm, 230mm et 330mm) en utilisant la trançonneuse, afin d'obtenir deux cadres de dimension de 330x330 mm² et 280x280 mm².

La réalisation

Après le découpage, l'assemblage et le soudage de ces deux cadres par le procédé TIG, nous obtenons les cadres montrés en Fig.VI.3.

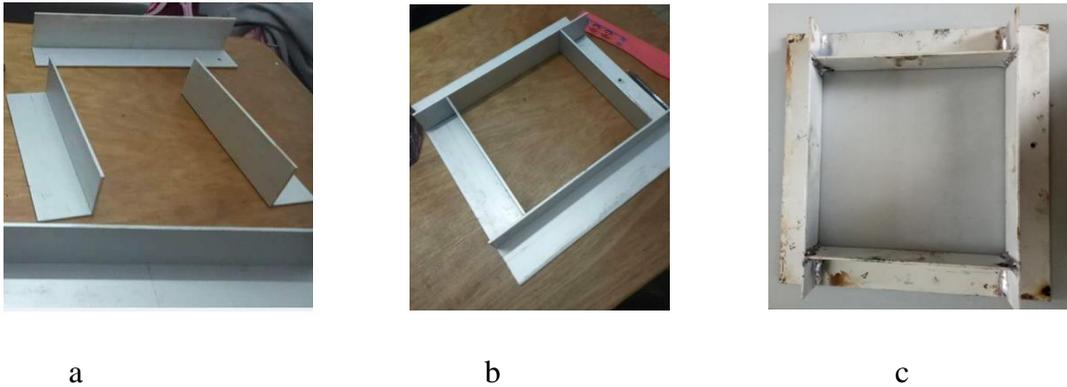


Fig.VI.3 : (a) découpage, (b) assemblage, (c) soudage des cornières.

d- Soudages des carrés d'aluminium aux centres de chaque côté des cadres :

ces petites pièces d'aluminium ont été soudées avec le procédé TIG sur les cornières afin d'augmenter l'épaisseur sur lesquelles seront percé des trous taraudés pour les vis de fixation du four entre les cadres (Fig.VI.4).



Fig.VI.4 : augmentation de l'épaisseur des cornières par de petites pièces carrées en aluminium.

e- perçage des cadres aux centre de chaque côté et le taraudage :

Nous avons percé les centres des cornières des cadres renforcés par les petits carrés, avec un foret de diamètre de 6.5mm, puis nous avons taraudé les trous avec un taraud de diamètre de 8mm (Fig. VI.5).



Fig. VI.5: perçage et taraudage des centres des cadres.

f- Découpage des coins des deux cadres et limage des soudures pour avoir une surface lisse (Fig. VI.6).



Fig. VI.6: découpage et limage des coins des cadres.

g- perçage des cerceaux et le taraudage :



Nous avons percé les cerceaux avec un foret de diamètre de 3mm, puis nous avons taraudé les trous avec un taraud de diamètre de 4mm (Fig. VI.7).

Fig. VI.7: perçage et taraudage des cerceaux.

h- perçage des pièces en résines avec un foret de diamètre de 4 mm (Fig. VI.8).



Fig. VI.8 : perçage des pièces en résine.

i- montages des pièces en résines sur les cerceaux



Fig. VI.9: fixation des pièces en résine sur le cerceau.

Nous avons fixé les pièces en résine sur les cerceaux par des vis à six ponts creux de diamètre de 4mm et de longueur de 15mm (Fig. VI.9).

j- montages des cadres aux centres des cerceaux :

Nous avons percé les pièces en résines et les cadres avec un foret de diamètre de 6 mm puis fixés avec des vis et des écrous de diamètre de 6mm (Fig. VI.10 et Fig. VI.11).



Fig. VI.10: montage des cadres sur les cerceaux.



Fig.VI.11: fixation des cadres en aluminium sur les pièces en résine.

k- Fixation du four sur le dispositif fabriqué (Fig.VI.12).



Fig.VI.12: fixation du four sur le dispositif fabriqué.

l- Ajustement du dispositif avec le four :

Cet ajustement est assuré en coupant quelques parties du cadre pour qu'il soit conforme aux mesures et formes de bouton et interrupteur du four (Fig.VI.13).



Fig.VI.13 : ajustement du dispositif avec le four.

m- Changement de la sortie du câble du four :



Lors de la fixation du dispositif (cerceau + pièces en résine + les cadres d'aluminium) sur le four nous avons rencontré un problème qui est l'emplacement du câble d'alimentation du four qui a gêné le serrage du dispositif sur le four. Pour régler ce problème, nous avons changé la sortie de ce câble. Afin de faire ce changement nous avons ouvert la boîte de réglage du four et enlevé le câble gênant. Un autre trou a été percé loin de l'emplacement du dispositif, et le câble fut placé dans son nouvel emplacement. (Fig.VI.14).

Fig.VI.14: changement de la sortie du câble du four.

n- Maintien de distance :



Fig.VI.15: maintien de la distance entre les cerceaux.

Pour maintenir la même distance entre les deux cerceaux nous avons placé des cornières en aluminium, en les fixant sur les cadres par des vis après avoir percé ces deux derniers. Le perçage est fait avec un foret de diamètre de 6mm (Fig.VI.15).

o- Maintien des cylindres d'aluminium (des entretoises) :



Fig.VI.16: maintien des entretoises.

La réalisation

Lorsque nous avons installé les quatre cornières identiques pour la fixation des deux cerceaux-cadres, un problème est apparu. Le petit cadre du deuxième dispositif cerceau-cadre ne touche pas ces cornières, donc nous avons mis des cylindres (entretoises) pour récupérer cette distance entre les cornières et le petit cadre (Fig.VI.16).

II. Fabrication du support pivotable

a. Fabrication du support pivotable :

- ce cadre est constitué de petites cornières en acier de longueur de 300 et 500 mm. L'assemblage et le soudage nous donne le cadre comme le montre la figure ci-dessous (Fig.VI.17).



Fig.VI.17: fabrication du support pivotable.

b. fabrication des galets :

- Usinages et tournages des pièces en acier :



Fig.VI.18: usinage et tournage des pièces en acier.

Nous avons choisis cette forme précisément pour que la résine soit bien fixée autour de ces pièces d'acier.

Ces pièces ont un diamètre intérieur de 10 mm et diamètre extérieur de 18 mm avec une longueur de 56mm. Pour que la résine ne bouge pas et les pièces ne sortent pas des centre de résine, nous avons réalisé des épaulements aux extrémités des pièces en acier de diamètre de 28mm. Et pour éviter la rotation de la résine autour de ces pièces nous avons faits des petits trous pour que la résine coule et pénètre dans ces trous afin que la pièce soit solidaire avec la résine (Fig.VI.18).

La réalisation

- Les galets ont été obtenu en coulant la résine dans des cylindres creux en tube PVC et en mettant les pièces en aciers au centre de chaque tube comme le montre la photo ci-jointe (Fig.VI.19) :



Fig.VI.19 : coulage de la résine pour la fabrication des galets.

- Après solidification de la résine, les cylindres obtenus ont été usinés par tournage afin de réaliser une rainure sur laquelle tourne notre dispositif (Fig.VI.20).

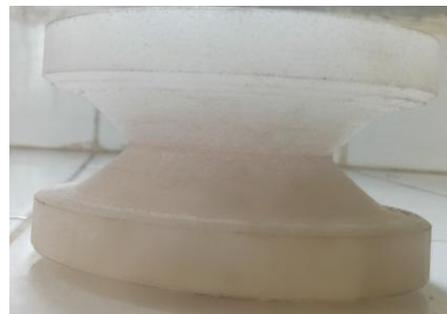


Fig.VI.20: galet usiné.

Cette forme est choisie afin que le contact entre le cerceau et la roue soit ponctuel pour éviter les frottements et du cout éviter l'usure de la roue. De plus la profondeur est choisie de telle sorte que le cerceau ne dévie pas de sa trajectoire (Fig.VI.20).

c. fabrication des supports des galets (Fig.VI.21) :

- découpage d'un fer plein à section rectangulaire de dimension 30x10 mm² en petits profilés de longueur de 70 et 120mm.



Fig.VI.21: fabrication des supports des galets.

- La Fig.VI.22 montre l'assemblage et le soudage de ces petits profilés en forme de U pour fixer les galets dedans sur le support par boulonnage.



Fig.VI.22: l'assemblage et le soudage des petits profilés.

d. montage :

- Perçage des supports des galets avec un foret de diamètre de 10mm (Fig.VI.23).



Fig.VI.23: perçage des supports des galets.

- usinage des arbres de fixation des galets (Fig.VI.24) :



Fig.VI.24: arbre de fixation des galets.

- fixation des galets dans ses supports par les arbres usinés puis les fixer avec des circlips (Fig.VI.25).



Fig.VI.25: fixation des galets dans leurs supports par les arbres usinés et circlips.

- le perçage du support qui porte le four par un foret de diamètre de 6.5mm (Fig.VI.26).



Fig.VI.26 : le perçage du support porteur du four.

- placement des supports des galets sur le support qui porte le four et vissage (Fig.VI.27).



Fig.VI.27: emplacement des galets sur le support.

III. Fabrication de système de transmission de mouvement

- a. Fabrication de la structure qui porte le réducteur de vitesse et le moteur :
Découpage des profilés carrés pour ensuite les souder et avoir un cadre de dimension 200 x 300 mm² (Fig.VI.28).



Fig.VI.28: fabrication du support porteur du moteur et réducteur.

- Découpage des cornières en acier de longueur de 450 mm et les assembler par soudage aux sommets du cadre(Fig.VI.29 et Fig.VI.30).



Fig.VI.29: découpage des cornières.



Fig.VI.30: assemblage et soudage des cornières sur le cadre.

- Découpage d'une plaque en bois et la fixer sur la structure par des vis et des écrous qui va servir de base pour porter le moteur et le réducteur de vitesse (Fig.VI.31).



Fig.VI.31 : fixation d'une plaque en bois sur la structure.

b. Fabrication des joints de cardon

- Découpage de fer plat et pliage pour avoir une forme en U(Fig.VI.32).



Fig.VI.32 : découpage et pliage du fer plat.

- Perçage de ce fer plat des trois côtés (Fig.VI.33).



Fig.VI.33: perçage du fer plat.

- Fabrication des croisillons en usinant deux axes perpendiculaires (Fig.VI.34).



Fig.VI.34: croisillons du joint de cardon.

- Fabrication des bagues pour fixer le croisillon dans les fers plats (Fig.VI.35).



Fig.VI.35: les bagues du joint de cardon.

- Montage des croisillons dans les fers plats pliés (Fig.VI.36).



Fig.VI.36: montage des croisillons sur les fers plats.

- c. Fabrication d'un support liant le four au joint de cardon.
- D'abord nous avons commencé par l'usinage d'une petite pièce pour bien maintenir le centre du four et que la rotation soit bien centré (Fig.VI.37). Cette pièce est fabriquée par tournage et fraisage suivis d'un perçage et taraudage.



Fig.VI.37: l'usinage d'une pièce pour le maintien des fers plats.

- Puis nous avons soudé cette dernière pièce avec le joint de cardon (Fig.VI.38).



Fig.VI.38: soudage de la pièce avec le joint de cardon.

- après nous avons fabriqué des petites barres à partir du fer plat. Une fois pliées, elles sont assemblées et fixés sur la pièce par des vis à six ponts creux (Fig.VI.39 et Fig.VI.40).



Fig.VI.39: pliage du fer plat.



Fig.VI.40: fixation des fers plats avec la pièce.

d. fixation de cet assemblage sur le cadre du four (Fig.VI.41).

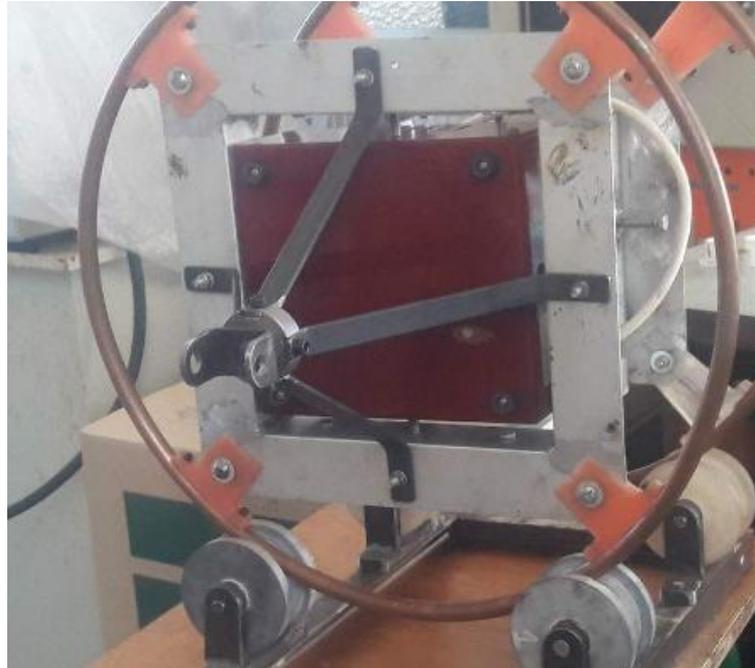


Fig.VI.41: fixation de l'assemblage sur le four.

e. Fabrication d'un axe qui transmet le mouvement et relie le joint de cardon au réducteur de vitesse (Fig.VI.42).



Fig.VI.42: l'axe de transmission de mouvement.

Après avoir taraudé le joint de cardon et fileter l'axe, nous avons vissé l'axe dans le joints de cardon.

Puis nous avons usiné une rainure dans cet axe pour placer une clavette afin de lier l'axe au réducteur de vitesse (Fig.VI.43).



Fig. VI.43: fixation de l'axe dans le réducteur et joint de cardon.

- f. Fixation du réducteur de vitesse sur la structure porteuse du réducteur de vitesse et du moteur (Fig.VI.44).



Fig. VI.44: fixation du réducteur sur la structure porteuse.

- g. Usinage d'un accouplement (Fig.VI.45 et Fig.VI.46).



Fig. VI.45 : un accouplement.



Fig.VI.46: usinage de l'accouplement.

- h. Usinage d'un axe liant le réducteur à l'accouplement (Fig.VI.47).



Fig.VI.47: axe liant le réducteur à l'accouplement.

- i. Usinage d'un axe liant l'accouplement au moteur (Fig.VI.48).



Fig.VI.48: axe liant l'accouplement au moteur.

- j. Fixation du moteur sur la structure porteuse du réducteur de vitesse et du moteur (Fig.VI.49).



Fig.VI.49: fixation du moteur sur la structure porteuse.

- k. Et finalement le montage des axes et l'accouplement entre le moteur et le réducteur de vitesse (Fig.VI.50).



Fig.VI.50: montage des axes et de l'accouplement.

La réalisation

Après l'assemblage de l'ensemble nous obtenons le système de rotation voulu d'un four de réduction comme illustré dans la figure suivante (Fig.VI.51) :



Fig.VI.51: système de rotation d'un four rotatif pour la réduction directe d'un minerai.

III. Conclusion

Comme illustré dans les étapes précédentes, des pièces mécaniques ont été conçues et fabriquées en utilisant différents matériaux, comme l'acier, l'aluminium, le cuivre, le bois et la résine. Ces pièces sont fabriquées individuellement soit par tournage, fraisage, perçage, taraudage et moulage. C'est ainsi que le montage des différentes pièces usinées soit par boulonnage et vissage, soit par soudage nous a permis d'obtenir le four rotatif que nous avons conçus pour la réduction direct de l'oxyde de silicium (SiO_2).

Il convient d'ajouter ici que le moteur électrique et le réducteur de vitesse à roue et vis sans fin ont été achetés sur le marché des équipements mécaniques.

Chapitre VII

Résultats et
discussions

I.introduction

Afin de perfectionner notre système, nous avons étudié les différents aspects techniques et mécaniques qui influent sur le rendement du four tel que la fraction remuée et la qualité de réalisation tel que le soudage.

II.Fraction remuée

La fraction remuée est un pourcentage massique d'une poudre en mouvement dans un creuset par rapport à la totalité de la poudre.

Elle donnée par la formule :

$$f_r = \frac{\text{la masse de la poudre en mouvement}}{\text{la masse totale de la poudre}} \% \dots\dots\dots \text{VII.1}$$

Afin de déterminer la fraction remuée optimale pour une poudre dans notre four, nous avons simulé cette expérience dans un tube à essais de diamètre de 20mm pour différents angles (de 0° à 90°) et aussi pour différentes masses de la poudre (25g, 50g, 75g).

L'objectif principal de cette expérience est de déterminer l'influence de l'inclinaison du four et la masse initiale introduite dans le four sur cette fraction remuée.

Les résultats de cette expérience sont donnés par les graphes illustrés dans les figures suivantes (Fig.VII.1, Fig.VII.2 et Fig.VII.3) en prenant la position verticale comme un repaire :

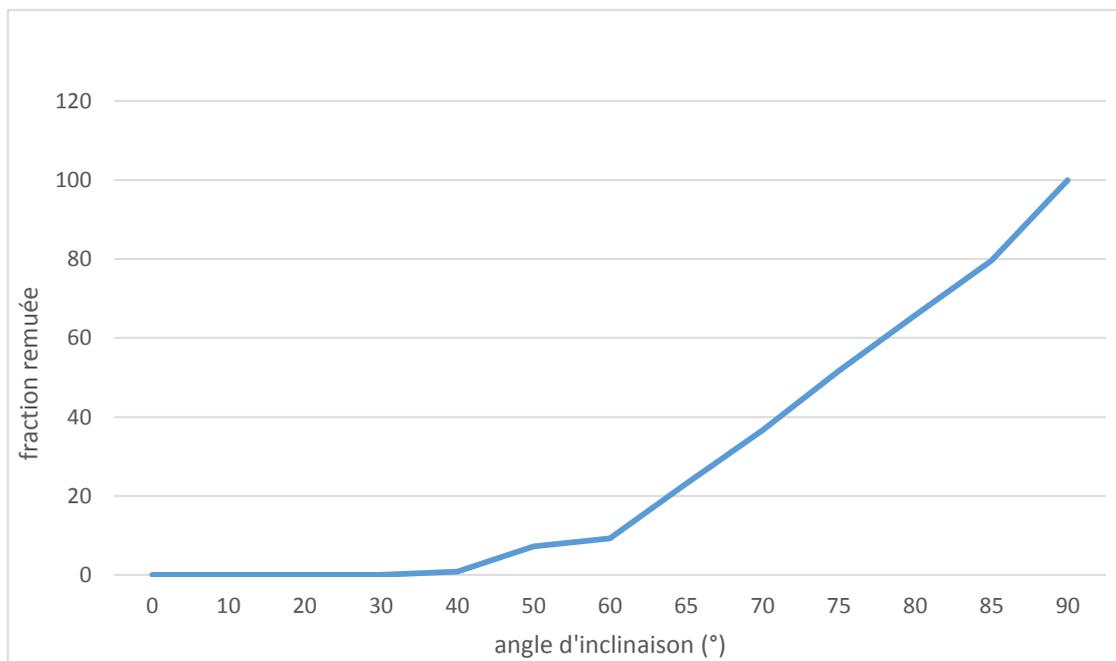


Fig. VII.1 : évolution de la fraction remuée en fonction de l'angle d'inclinaison pour une masse de 25g.

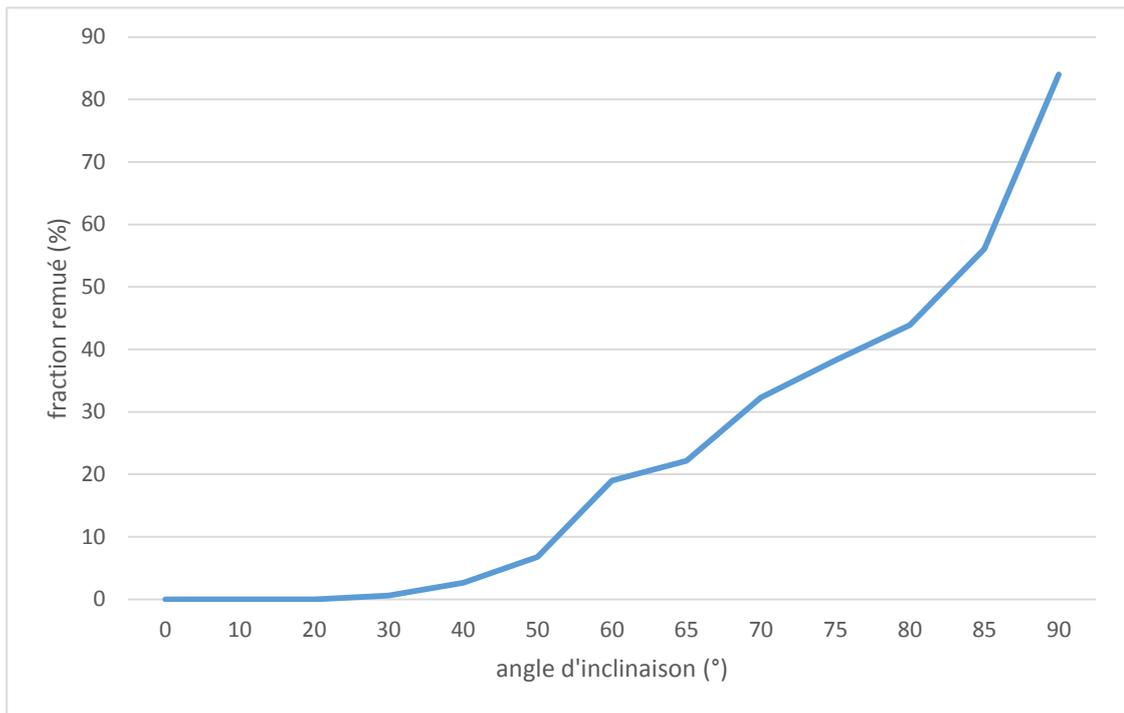


Fig. VII.2 : évolution de la fraction remuée en fonction de l'angle d'inclinaison pour une masse de 50g.

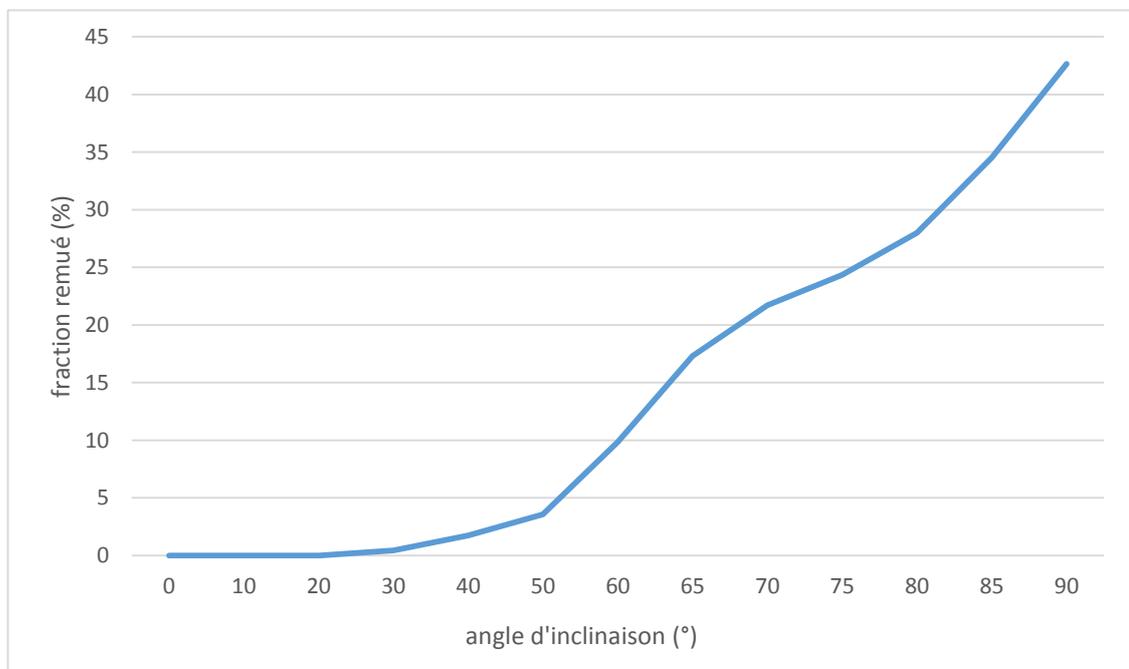


Fig. VII.3 : évolution de la fraction remuée en fonction de l'angle d'inclinaison pour une masse de 75g.

D'après ces graphes nous remarquons que la fraction remuée augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison.

Pour un même angle nous remarquons que la fraction remuée diminue avec l'augmentation de la masse.

Donc d'après cette expérience nous constatons que la meilleure position pour avoir une fraction remuée maximale c'est la position horizontale, qui est équivalente à l'angle de 90°.

Mais le problème qui se pose pour un angle de 90° c'est que la charge à désoxyder va se déborder du creuset. Du coup nous constatons que la meilleure position pour avoir un rendement maximal sans débordement de la charge, c'est de choisir un angle légèrement inférieurs à 90° (85°) par rapport à la verticale. Soit 5° par rapport à l'horizontale.

II. Coefficient de frottement

La force de frottement apparaît au contact de deux surfaces. Cette force s'oppose au mouvement relatif des deux surfaces. Elle dépend de la nature de ces surfaces

Les frottements sont très souvent perçus uniquement comme responsables de la diminution de la vitesse d'un mobile dont on aimerait bien qu'elle se maintienne.

D'autre part, le frottement s'accompagne d'un phénomène d'usure des pièces mécaniques et de perte de puissance par abrasion, dont l'importance économique est grande.

On s'intéresse au frottement entre les matériaux utilisés dans les machines ou les objets fabriqués dans le but de le réduire, ou bien de l'augmenter.

Selon le dispositif servant à mesurer les forces de frottement, appelé tribomètre, le laboratoire de dimensionnement des structures de Lyon a pu résumer les différents coefficients de frottement entre différents matériaux dans le tableau suivant (tableau VII.1) [15]:

Tableau VII.1 : les coefficients de frottement entre différents matériaux [15].

Matériaux 1	Matériaux 2	Contact	Coefficient de frottement dynamique	Coefficient de frottement statique
Acier	Acier	Sec	0.1	0.15
Acier	Acier	Graissé	0.05	0.12
Acier	Aluminium	Sec	-	0.28-0.35
Acier	Bronze	Sec	0.18	0.19
Fonte	Fonte	Graissé	0.1	0.16
Bronze	Bronze		0.2	0.43

C'est sur la base de ce tableau que nous avons effectué le choix des matériaux entrant dans la fabrication des pièces fonctionnelles ; c.-à-d. celles qui sont en mouvement relatif les unes par rapport aux autres.

III. Soudage

Durant toute la réalisation nous avons utilisé deux procédés de soudage, un pour le soudage d'aluminium (TIG) et l'autre pour le soudage des aciers (SMAW).

III.1. Procédé TIG

Le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) est un procédé de soudage à l'arc où la chaleur est produite par un arc établie entre une électrode non consommable de tungstène et la pièce à souder, avec ou sans métal d'apport. L'arc, le métal d'apport et l'endroit soudé sont protégés contre la contamination atmosphérique par un gaz inerte.

Les avantages de ce procédé c'est qu'il représente une forte densité d'énergie et une température localement plus élevée. Il est protégé par un gaz inerte.

Pour ce procédé nous utilisons les gaz inerte argon, hélium, mélange argon-hélium et mélange argon-hydrogène. Mais le plus utilisé de ces gaz c'est l'argon pour ces différents avantages qu'il offre (arc plus stable et moins chaud, l'argon étant plus lourd que l'air, une protection est obtenue par un faible débit et avec un coût moins cher que les autres gaz).

Nous avons choisis ce procédé pour le soudage de l'aluminium pour créer une atmosphère inerte autour de l'endroit à souder afin d'éviter la formation de la couche d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 qui empêche le soudage.

III.2. Procédé SMAW

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder.

L'électrode est constituée de l'âme qui est une partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure, et de l'enrobage qui est la partie extérieure cylindrique de l'électrode et qui participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion.

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. La table sur laquelle nous mettons notre pièce à souder est reliée au générateur. L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder.

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée demeure toujours un procédé très utilisé, car il permet une grande liberté d'exécution, une grande autonomie et l'équipement requis est le moins coûteux qui soit. Ainsi, selon la technique utilisée, il devient possible de réaliser des soudures dans n'importe quelle position de soudage.

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est utilisé pour souder une grande variété de métaux et alliages, tels que les aciers doux et les autres aciers au carbone.

Résultats et discussions

Pour notre cas nous avons choisis ce procédé de soudage pour souder les différentes pièces en aciers à cause de sa disponibilité à notre établissement, la nature et la composition des pièces utilisées, la complexité des formes des pièces ainsi leurs tailles qui demande plus de précisions, aussi parce que c'est le procédé qui peut réaliser des soudures dans n'importe quelle position.

IV. Réducteur de vitesse

Un réducteur de vitesse a pour but de modifier le rapport de vitesse ou/et le couple entre l'axe d'entrée et l'axe de sortie d'un mécanisme, il est utilisé pour la transmission de mouvement.

L'orientation des axes peut présenter en quatre configurations :

- soit l'axe du moteur est déporté par rapport à l'axe de sortie : c'est le cas des réducteurs à engrenages des boîtes de vitesses traditionnelles ;
- soit l'axe du moteur est dans l'axe de sortie : employés dans les moteurs ou turbopropulseur d'avion ;
- soit l'axe moteur est perpendiculaire à l'axe de sortie : les réducteurs et moto-réducteurs par couple conique, les roues et vis sans fin pour les installations industrielles et les ponts-différentiels d'automobile ;
- soit l'axe moteur est parallèle à l'axe de sortie : les transmissions classiques telles que la transmission par poulies et courroie, par chaîne et pignons et par engrenages de tous types.

Dans notre cas, nous avons besoin d'une transmission de mouvement avec une réduction de vitesse, plus un changement de direction des axes. Donc la configuration qui convient pour notre cas, c'est que l'axe du moteur soit perpendiculaire à l'axe de sortie de réducteur et ça convient à un réducteur de vitesse à vis et roue sans fin.

Le graphe ci-dessous montre les résultats de l'expérience faite pour déterminer le rapport de réduction du réducteur de vitesse utilisé dans notre dispositif.

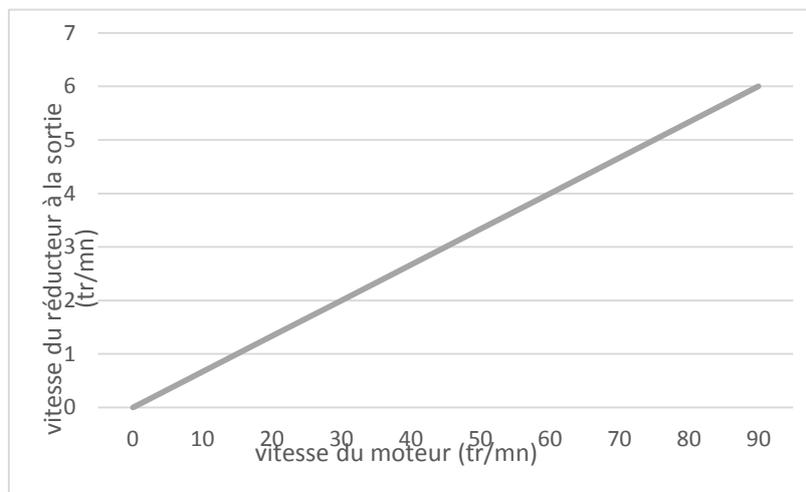


Fig. VII.4 : évolution de la vitesse à la sortie du réducteur en fonction de la vitesse du moteur.

Nous remarquons que la vitesse du réducteur augmente avec l'augmentation de la vitesse du moteur.

Le graphe présente une droite avec une pente « a » :

$$a = \frac{60 - 30}{4 - 2} = 15$$

La pente « a » présente le rapport de réduction de notre réducteur de vitesse. Donc le réducteur utilisé réduit la vitesse du moteur de 15 fois.

V. Engineering :

Les ingénieurs identifient un problème et proposent une solution, créant souvent quelque chose complètement nouveau dans le processus.

Le processus de conception technique est une série d'étapes que les ingénieurs suivent pour trouver une solution à un problème. La solution consiste à concevoir un produit qui répond à certains critères et / ou accomplit d'une certaine tâche. Par exemple, dans notre cas nous avons le problème de frittage de la poudre lors de sa réduction si le four reste immobile. Comme solution nous avons fabriqué un dispositif de rotation pour le four afin qu'il soit au mouvement lors de la réduction. Notre projet implique la conception, la construction et les essais, donc nous avons suivis les processus de conception technique.

Pendant la réalisation mécanique de n'importe quelle machine ou système, l'ingénieur mécanicien a besoin de savoir les différentes propriétés des matériaux dont il a besoin. C'est ici qu'intervient le rôle de l'ingénieur en science et génie des matériaux, qui prend en considération ces propriétés et propose les matériaux qui conviennent le mieux.

Pour la conception et la réalisation du système de rotation du four, nous avons besoin de satisfaire plusieurs propriétés dans la sélection et le choix des matériaux, comme montré dans la deuxième partie du chapitre V.

VI. Conclusion

Après avoir étudié les différents aspects techniques et mécaniques, nous passerons à l'application de ces derniers sur notre système ; le soudage des différentes pièces, l'angle d'inclinaison du four influant sur le taux de réduction du minerai et la vitesse à la sortie du réducteur qui influe sur le mouvement de la charge à l'intérieur du creuset.

Conclusion générale

Conclusion générale

La réalisation d'un bon travail nécessite la maîtrise de plusieurs techniques et concepts. Donc si un ingénieur veut faire un bon travail, il doit prendre en considération tout imprévu et il ne faut pas qu'il soit lié à une seule spécialité, mais plutôt il doit être polyvalent.

Notre sujet intitulé : « conception et réalisation d'un four rotatif pour l'élaboration de silicium métallurgique par réduction directe de SiO_2 » fait intervenir deux spécialités en même temps, la science et génie des matériaux pour le choix des matériaux en se basant sur les propriétés essentielles que doivent satisfaire chaque matériaux utilisé, et le génie mécanique pour la réalisation des différentes pièces du système tout en se basant sur l'usinage des pièces (tournage, fraisage, soudage et perçage) ainsi que le montage.

Dans ce document, nous avons traité des fours industriels en expliquant les différents matériaux utilisé lors de leurs réalisations.il était aussi question de comprendre les sources de chaleur et les modes de transfert de chaleur qui opèrent dans ces fours. Un autre aspect important dans les fours rotatifs est le mouvement de la charge ainsi que le rendement des fours. Dans la deuxième partie, qui concerne la réalisation expérimentale, nous avons fait un design explicatif de notre dispositif afin de présenter les différents matériaux à utiliser, puis nous avons passé à un autre chapitre qui explique les différentes étapes de la réalisation du système. Finalement, il s'agit de faire une synthèse entre les ingénieurs de différentes spécialité qui interviennent dans la mise au point d'un dispositif donné.

Après le montage et essais dynamiques, nous avons constaté que les matériaux choisis et utilisés ont bien joués leurs rôles.

Aucune pièce n'a subi de déformation ni de rupture.

Les pièces isolantes (les pièces en résines) ont également bien joués leurs rôles car nous n'avons observé aucun court-circuit ni courant de Foucault sur la structure générale du four.

Le moteur et le réducteur de vitesse ont également bien joués leurs rôles en assurant un intervalle de vitesses de rotation compris entre 0 et 90 trs/mn. Cet intervalle permet une très bonne stabilité du four sur son système de rotation.

Nous pensons que l'intervalle de vitesses de rotation ci-dessus nous permet un large choix de vitesses comme variables du procédé lors des opérations de réduction ultérieures.

Proposition des travaux complémentaires

Après avoir réalisé le système, nous avons rencontré deux problèmes ; le premier est l'alimentation des cerceaux en cuivre avec de l'électricité, ce qui provoque un danger majeur sur la vie des gens. Le deuxième c'est lors de la réduction, il y aura une perte majeure du carbone utilisé pour la réduction à cause de sa réaction avec l'air oxydant au lieu de réagir avec SiO_2 seulement. Donc pour cela nous avons pensé à une solution que nous n'avons pas eu le temps de la réaliser, malheureusement, c'est de réaliser une chambre sous vide dans laquelle nous mettons notre dispositif.

Cette chambre nous permettra d'être en sécurité et d'éviter le danger de l'électricité provenant des cerceaux.

Aussi en réalisant cette chambre, la seule réaction qui se produira dedans est la réaction de réduction de SiO_2 . Donc nous éliminons la perte en masse du carbone du creuset qui aurait dû réagir avec l'air oxydant.

Pour cela nous proposons de réaliser cette chambre pour plus de sécurité, de fiabilité et d'économie du carbone.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1]. PETER MULLINGER and BARRIE JENKINS. ' ' industrial and process furnaces principals, design and operations ' ' . Edition Elsevier. USA (2008).
- [2]. W.TRINKS. ' ' indusrial furnaces 6th ed ' ' . Edition JOHN WILEY & SONS. New Jersey (2004).
- [3]. MICHEL FEIDL. ' ' Chaudières et fours industriels ' ' .technique de l'ingénieur, BE8842, (année 2012).
- [4]. H.P. Kritzinger and T.C.Kingsley. ' ' modelling and optimization of a rotary kiln direct reduction process ' ' . Pyrometallurgical Modelling. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- [5]. A.A.BOATENG. ' ' rotary kilns transport phenomema and transport processes ' ' . Edition Elsevier. USA (2008).
- [6]. Fabian Herz, Ilian MITOV, Eckehard Specht, Rayko Stanev. ' ' Influence of operational parameters and materials properties on the contact heat transfert in rotary kilns ' ' . International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 7941–7948.
- [7]. H.F.Elatter, Rayko Stanev, Eckehard Specht, A.Fouta. ' ' CFD simulation of confined non-preximed jet flames in rotary kilns for gaseous fuels ' ' . Computers & Fluids 102 (2014) 62–73.
- [8]. C.P.Kothandaraman. ' ' fundamentals of heat and mass transfer 3rd ed ' ' . Edition NEW AGE INTERNATIONAL PUBISHERS. New Delhi (2006).
- [9]. EDUARDO CAO. ' ' heat transfer in process engineering ' ' . Edition Mc Graw-Hill Compagnies. USA(2010).
- [10]. A. Guillermic. ' ' Le chauffage par les combustibles liquides Tome 1 ' ' . ed TECHNIP (1980).
- [11]. T.NADJAFOV ET N. NIKOPORETS. ' ' fours métallurgiques tome1 ' ' . Edition Office des publications universitaires. ALGERIE (1983).
- [12]. El Airag Hind, Marmouche El Moukhtar. ' ' étude et optimisation du rendement du four ' ' . PFE, FST Fes (2012).
- [13]. François HANROT. ' ' ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE ET MODELISATION DE LA PYROLYSE DE GRAINS DE CHARBON EN FOUR TOURNANT ' ' . thèse de doctorat, INPL(1992).
- [14]. <https://www.scribd.com/document/20055962/Energy-Performance-Assessment-of-Furnaces>. 23-04-2018.
- [15]. <http://dds.univ-lyon1.fr/> . 02-05-2018.