

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

16/87

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

152

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT Mine Et Metallurgie

BIBLIOTHEQUE - المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

SUJET

ETUDE ET REALISATION D'UN  
FOUR DE FUSION BASCULANT  
ELECTRIQUE.

Proposé par :

J Karpati

Etudié par :

C. Derder

Dirigé par :

.Karpati

1 PLANCHE

PROMOTION Juin 87

-- DEDICACES --

Je dedie ce travail à :

- la mémoire de ma soeur SALAOUA ;
- mon père ;
- ma mère ;
- mes frères et soeurs à qui je souhaite beaucoup de réussite dans les études ;
- mon beau-frère MAHMOUD ;
- tous ceux qui ont contribué de loin ou de près dans ce projet .

-- REMERCIEMENTS --

Je tiens à remercier Monsieur KARPATI , mon promoteur pour son aide fructueuse et ses conseils sans cesse renouvelés tout au long de la réalisation de ce projet, Monsieur MOURAD pour la mise en forme dupolycopié et Monsieur SAADA pour son sincère dévouement et sa confiance

Je profite en cette occasion pour remercier messieurs :

- SALHI ;
- BOUABDALLAH
- SEBAA du C.E.N ;
- ATI du C.E.N .

§§§§§§§§§§§§§§§§ S O M M A I R E §§§§§§§§§§§§§§§§

INTRODUCTION.....	1
<b>1- NOTIONS SUR L'ELECTROTHERMIE</b>	
1.1 HISTORIQUE.....	1
1.1 ELECTROTHERMIE ET PROCESSUS INDUSTRIELS.....	2
1.3 EVOLUTION DE L'ELECTROTHERMIE INDUSTRIELLE.....	4
1.4 TYPE DE FOUR.....	5
1.5 CHOIX DU TYPE DU FOUR.....	6
<b>2- NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR..</b>	<b>7</b>
2.1 CONCEPTS FONDAMENTAUX ET EQUATIONS DE LA CONDUCTION.....	9
2.2 LOI DE FOURIER.....	13
2.2.1. REGIME PERMANENT.....	13
2.2.2. REGIME VARIABLE.....	18
2.3 LA CONVECTION.....	19
2.3.1..... COEFFICIENT DE CONVECTION.....	20
2.3.2 TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION..	22
2.3.3 TRANSMISSION DE CHALEUR.....	23
2.4 LE RAYONNEMENT.....	25

### 3- CHAUFFAGE PAR RESISTANCES

APPLICATION AU FOUR ELECTRIQUE.....	27
3.1 PRINCIPE DE CHAUFFAGE.....	27
3.1.1. PUISSANCE DISSIPÉE DANS UNE RESISTANCE.....	27
3.2 CONSTITUTION ET CARACTERISTIQUES DES FOURS A RESISTANCE.....	28
3.2.1 TRANSMISSION DE CHALEUR.....	28
3.2.2 CALCUL DE PUISSANCE D'UN FOUR A RESISTANCE.....	31
3.2.3 RENDEMENT DES FOURS A RESISTANCE....	34
3.2.4 DIFFERENTS TYPES DE FOUR.....	36
3.2.5 LES REFRACTAIRES ET LES ISOLAMTS....	37
3.3 LES RESISTANCES ELECTRIQUES.....	42
3.4 FORMES ET DISPOSITION DES RES RESISTANCES..	46
4- ETUDE ET REALISATION D'UN FOUR DE FUSION	54
4.1 CALCUL DE LA PUISSANCE A INSTALLER.....	56

- CONCLUSION

C H A P I T R E 1

- Introduction

1. - GENERALITES

1 : HISTORIQUE

Lorsqu'on veut décrire le vaste domaine de l'électrothermie, il convient de jeter tout d'abord un bref coup d'oeil sur l'histoire de son développement. Le tour d'horizon suivant résume les dates marquantes du développement de l'électrothermie dans le four à résistance, à arcs et à induction.

Fours à résistance

- 1761 - 1767 Franklin, Kinnersley et Priestley réussirent à porter des fils à incandescence et à les fondre à l'aide de bouteilles de LEYDE.
- 1843 Enoncé de la loi de JOULE.
- 1851 Dépôt par Simpson du premier brevet relatif au chauffage électrique (U. S. A.)

Fours à arcs

- 1815 CHILDREN parvient à vaporiser de l'acide tungstique dans un arc électrique.
- 1879 W. V Siemens utilise pour la première fois l'arc électrique pour la fusion de l'acier.
- 1906 Apparition du premier four à arcs industriel.

Fours à induction

- 1860 Foucault constate que les courants induits dans des conducteurs provoquent des phénomènes d'échauffement.

- 1840 MAXWELL établit la théorie de l'induction électromagnétique.
- 1887 DE FERRANTI propose pour la première fois d'appliquer aux fours utilisés en métallurgie le phénomène d'induction qui régit le fonctionnement d'un transformateur.
- 1899 Kjellin invente le four à induction à canal ouvert.

Le développement technique peut se diviser en trois étapes successives.

A partir de 1900 a commencé le développement des fours à arcs à grandes puissances installés et à fortes consommations, utilisés en particulier pour la fabrication du carbure de calcium et la fusion électrique de l'acier. C'est aux environs de 1914 que l'on peut noter le développement des unités moyennes et des grandes unités dans le domaine du four à induction ; et déjà, à cette époque, on reconnaissait comme essentiels les différents avantages que présentaient ces fours, du point de vue de la qualité du produit élaboré et de la diminution des pertes au feu.

Le développement des petites et moyennes unités a commencé à partir de 1920 en particulier dans le domaine des fours à résistance.

## 1.2 ELECTROTHERMIE ET PROCESSUS INDUSTRIEL (2)

Depuis les forges de Vulcain, de nombreux progrès ont été accomplis en chauffage industriel et les opérations thermiques, se sont considérablement diversifiées (traitements thermiques, cuisson, polymérisation, séchage, fusion lyophilisation...) ; un fait fondamental demeure toutefois : l'essor de l'industrie a toujours été étroitement lié aux disponibilités en énergie et le choix dominant d'une source d'énergie la conséquence" de la rareté des ressources alternatives ou d'innovations technologiques modifiant les conditions de concurrence entre les différents sources.

Au delà des simples considérations de coût et de disponibilité qui justifient l'utilisation de l'électricité à des fins thermiques dans les processus industriels, l'électrothermie doit toutefois une grande partie de son développement aux caractéristiques spécifiques de cette forme d'énergie :

- Facilité de mesure de contrôle et de régulation;
- aptitude à une localisation très précise de l'effet thermique ;
- rendement de conversion de l'énergie très élevé ;
- possibilité d'obtenir des niveaux de température très importants ;
- densité de puissance élevée ;
- utilisation décentralisée et modulaire aisée ;
- facilité d'automatisation et reproductibilité des conditions de chauffage ;
- contrôle aisé de l'atmosphère de travail ;
- qualités élevées des produits élaborés ;
- limitation de la pollution et amélioration des conditions de travail.

Mais une des propriétés les plus remarquables de l'électricité est son caractère protéiforme ; elle est en effet mobilisable, à des fins thermiques sous des formes très diverses.

En fonction du mode de transmission de l'énergie, les procédés électrothermiques sont souvent divisés en deux grandes catégories :

Le chauffage indirect où la transmission d'énergie se fait de la source de chaleur au corps à chauffer en obéissant aux lois usuelles de la thermique ;

- Le chauffage direct où le corps à chauffer est parcouru par un courant électrique et donc lui-même le siège du dégagement de chaleur, les échanges ultérieurs de chaleur s'effectuant selon les lois de la thermique. (voir figure 1)

Chauffage direct	Chauffage indirect
- chauffage direct par resistance ( conduction )	- Chauffage indirect par resistance
- Chauffage par induction electromagnetique	- Chauffage par rayonnement infrarouge
- Chauffage dielectrique . haute frequence . HYPERFREQUENCE ( microonde )	- Chauffage indirect par arc
- Chauffage par bombardem- ent electronique	- Chauffage par plasma
- Chauffage par laser	
- Chauffage direct arc	

FIG.1 . REPARTITION DES PROCEDES ELECTROTHERMIQUE ENTRE CHAUFFAGE DIRECT INDIRECT

### 1.3 EVOLUTION DE L'ELECTROTHERMIE INDUSTRIELLE

Depuis le début du vingtième siècle, l'utilisation de l'électricité a des fins thermiques dans l'industrie n'a cessé de croître.

Cette évolution s'articule autour de quelques axes principaux ( )

#### 1.3.1. Accroissement des densités de puissance

L'augmentation de la productivité est souvent synonyme d'accroissement de la densité de puissance deux grandes tendances se dégagent toutefois :

- l'amélioration des procédés classiques ;
- le recours à des procédés particuliers.

##### 1.3.1.1. Amélioration des procédés classiques

L'accroissement de la densité de puissance du chauffage par résistance résulte essentiellement de :

- L'amélioration des alliages métalliques utilisés pour la fabrication des résistances en particulier l'augmentation de leur température maximale d'utilisation ;
- des progrès en matière de régulation, en particulier de l'utilisation de capteurs de température à faible inertie thermique et d'alimentations statiques à thyristors ;

./.

#### 1.4 Types de Four

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

Il y a deux façons d'effectuer cette transformation

- dans l'arc
- dans des résistors, solides ou liquides

Par suite on divise les fours électriques en four à arc et en four à résistances.

ce deuxième groupe à son tour peut se diviser en deux catégories : les fours à chauffage direct et à chauffage indirect (voir la figure 2 D)

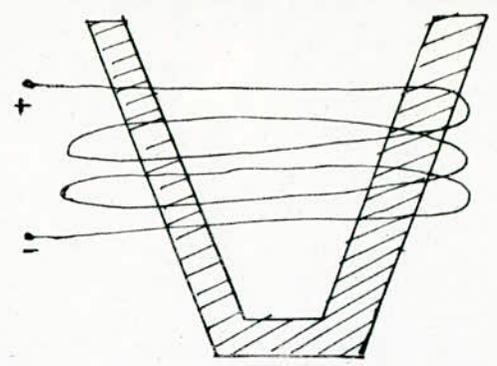
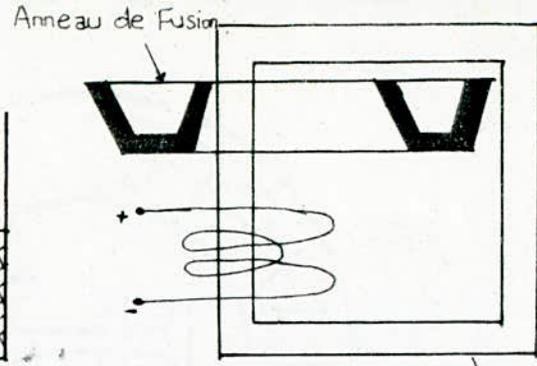
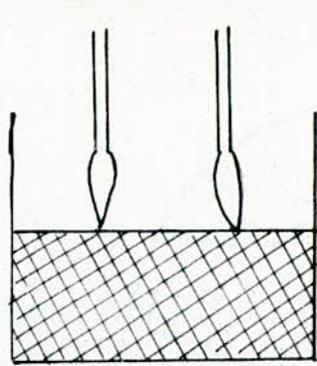
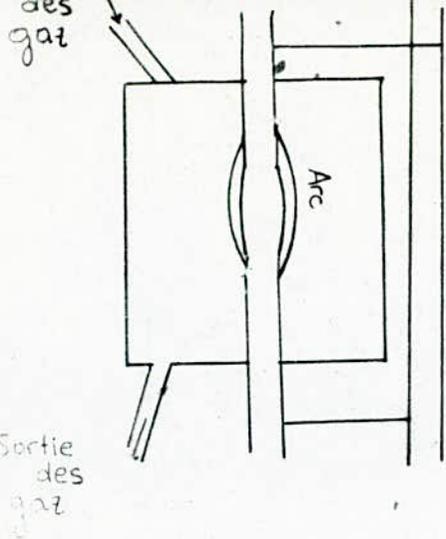
Ces fours à résistances à chauffage direct peuvent se diviser en deux catégories : les fours à chauffage direct et à chauffage indirect (voir

Ces fours à résistances à chauffage direct peuvent se diviser en fours à électrodes et à induction.

Dans les fours à électrodes à résistances le courant est appliqué à la charge au moyen d'électrodes ; dans les fours à résistances le courant est transmis sans contact physique entre le système d'alimentation et la charge.

Dans les fours à électrodes à résistances alimentés en haute fréquence, il n'est pas nécessaire que les électrodes touchent la charge : le courant haute fréquence peut passer de l'électrode à la charge en traversant la couche d'air qui les sépare.

Certains fours à induction ont des circuits magnétiques, alors que d'autres n'en ont pas (four HFI).

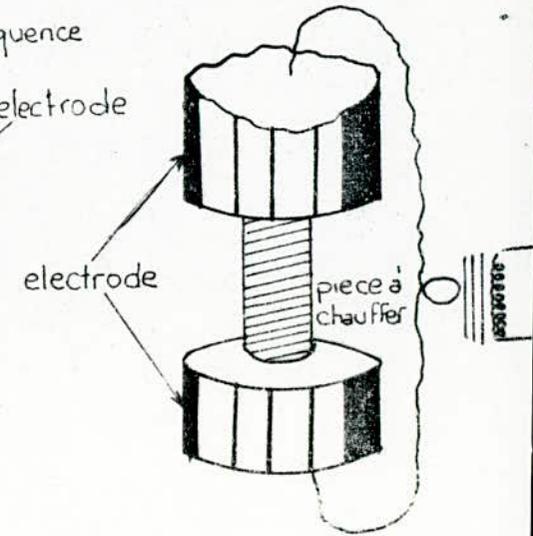
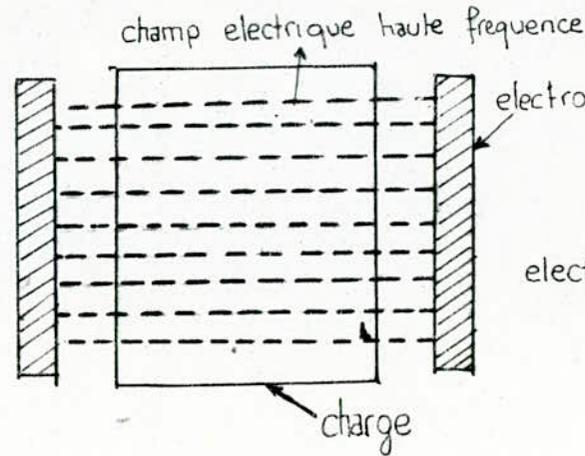
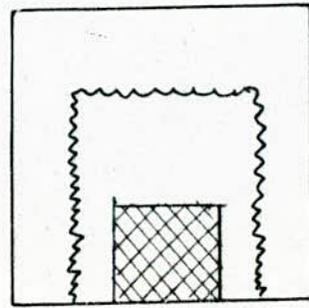
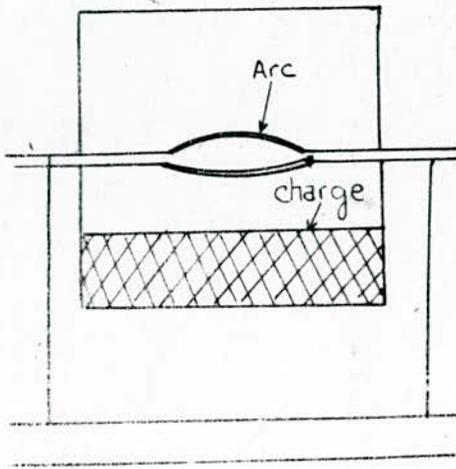


- Four à arc à chauffage direct.

- Arc . resistance .

- Induction .

- HFI .



- à arc à chauffage indirect.

- à resistance .

- à electrode haute fréquence .

- à electrode basse fréquence .

## 1.5 CHOIX DU TYPE DE FOUR

Pour choisir le type de four qui convient le mieux pour exécuter une opération particulière, il faut se baser sur les considérations suivantes :

- Les fours à arc ne peuvent monter plus haut que la température dans l'arc qui est de l'ordre de 3600 °C.
- Les fours à résistances à chauffage direct c'est-à-dire les fours à induction et à électrodes ne peuvent pas dépasser la température maximum que peuvent supporter les électrodes et le garnissage des fours.
- Les fours électriques haute fréquence à pertes diélectriques (fours HFC) ne sont utilisables que pour des pièces relativement mauvaises conductrices du courant électrique.

Les données du tableau de la figure 3 permettent de voir que les fours à résistance à chauffage indirect ne peuvent être utilisés indifféremment, les trois types qui peuvent dans certains cas être en compétition sont :

- Les fours à arcs et les fours à induction pour les températures élevées ;
- Les fours à induction et les fours à résistances pour les basses températures ;
- Les fours haute fréquence à perte diélectriques et les fours à résistances pour les produits non métalliques.

CH A P I T R E    I I

NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR

## C H A P I T R E 2

NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE TRANSFERT DE  
CHALEUR

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température et cela quelque soit le milieu, même vide, qui les sépare. De ce fait, les transferts thermiques ont, aussi bien dans le domaine des sciences pures que dans celui des applications technologiques, un rôle souvent essentiel. Ce rôle devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, calorifugeage, utilisation de l'énergie solaire,.....)

1 THERMODYNA ET TRANSFERTS THERMIQUES

A la base de l'étude des transferts thermiques se trouvent les concepts de quantités de chaleur et de différence de température. Ceux-ci sont définis par la thermodynamique dans ses principes :

- équivalence de la chaleur et du travail comme forme particulière de l'énergie (premier principe).
- mesure du déséquilibre thermique relatif de deux systèmes par leur différence caractérisant le sens et l'intensité de l'énergie calorifique transférée (second principe). (3)

## 1.1 LES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR (3)

Il est habituel dans une étude de transfert thermiques, de distinguer trois grandes parties se rattachant chacune d'un mode de transfert de chaleur particulier : conduction, rayonnement, et convection, chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé.

En effet, comme l'énergie thermique d'un milieu matériel correspondant à l'énergie cinétique de ses constituants fondamentaux ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes, électrons libres...), ceux-ci pourront échanger tout ou partie de leur énergie thermique, c'est-à-dire gagner ou perdre de l'énergie cinétique :

- Soit par interaction directe avec les particules voisines (choc de molécules par exemple, ce qui correspond à la conduction ,
- Soit par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement.

Enfin dans le cas d'un gaz ou d'un liquide, on considère, mais cette fois à l'échelle macroscopique, comme un mode de chaleur appelé convection, les échanges résultant du mélange de diverses parties d'un fluide à des températures différentes.

En pratique les trois modes se trouvent presque associés dans un problème de thermique industriel.

## 2 La Conduction

La conduction thermique est la propagation de la chaleur de molécule à molécule dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et opaques, sans

./.

qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission.

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur à l'intérieur d'un corps solide.

## 2.1. Concepts Fondamentaux et équations générales de la Conduction (3)

### 2.1.1. Champ de température

On peut définir en chaque point M d'un corps solide, liquide ou gazeux une température, fonction scalaire des coordonnées du point et du temps T (M,t) lorsque la température dépend du temps, on dit que le régime est variable. Dans le cas contraire, on dit qu'il est permanent.

### 2.1.2 Quantité de chaleur, flux et densité de flux thermiques

Considérons un plancher chauffé de manière uniforme sur toute sa surface S. Soit dQ la quantité de chaleur échangée entre ce plancher chauffant et l'air ambiant pendant le temps dt. On appelle :

- flux thermique : la puissance échangée par la surface S du plancher.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots 2.1$$

- densité de flux thermique : la puissance échangée par une surface unité de ce plancher

$$\gamma = \frac{dQ}{Sdt} = \frac{\phi}{S} \quad 2.2$$

D'une façon plus générale, pour un élément de surface  $ds$  orienté par sa normale unitaire (figure.4...) le flux élémentaire  $d\phi$  peut être considéré comme le flux d'un vecteur à travers  $ds$ , d'où :

$$d\phi = \vec{\gamma} \cdot \vec{n} \, ds \quad 2.3$$

le vecteur  $\vec{\gamma}$  représente la densité locale du flux thermique au point M. Il caractérise en chaque point du milieu, la direction, le sens et l'intensité du flux de chaleur.

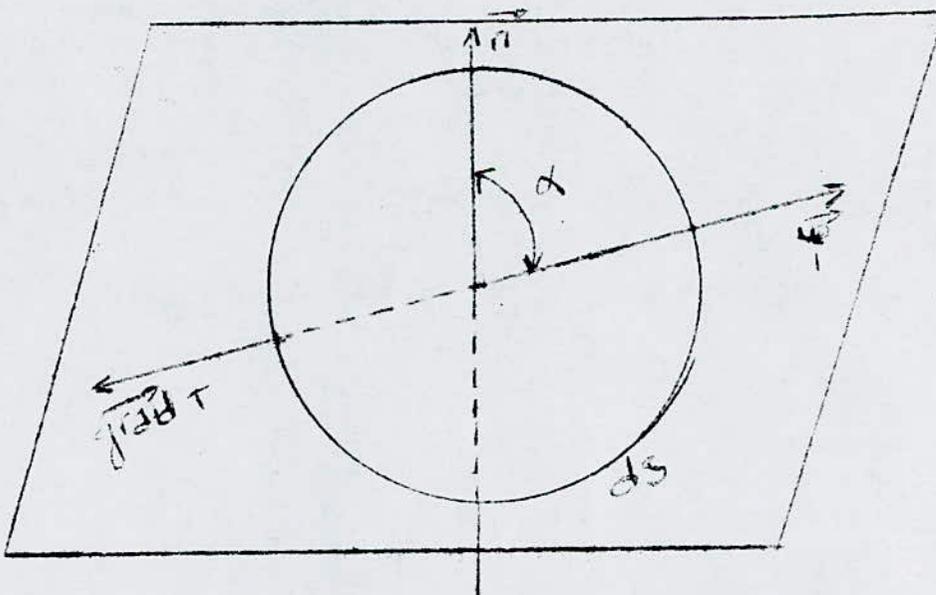


FIG. 4. — Loi de Fourier.

Dans les relations précédentes :

Q représente une énergie et s'exprime dans le système unité SI, en Joule,

O représente une énergie par unité de temps, c'est-à-dire une puissance et s'exprime en watt

densité de flux thermiques, représente une puissance par unité de surface et s'exprime en watt/m<sup>2</sup>

### 2. 2 Loi de Fourier (3)

En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique du milieu et gradient de température :

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad} T$$

Cette expression peut se mettre dans le cas d'un milieu à une dimension ou lorsque, pour des raisons de Symétrie la température ne dépend que de l'une des coordonnées (paroi plane, cylindrique ou sphérique par exemple) sous la forme :

$$\frac{dQ}{dS} = - \lambda \frac{dT}{dx} \quad 2.4$$

L'application de la loi de Fourier a un élément de matière de cotés dx, dy, dz permet en utilisant le calcul intégral de déterminer les quantités de chaleur transmises par conduction à travers des corps de forme quelconque (relation habituellement appelée équation de la chaleur)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad 2.5.$$

C et f désignent la chaleur spécifique et masse spécifique du matériau l'expression précédente suppose que  $\lambda$  est indépendante de la température, ce qui n'est le cas qu'une première approximation.

varie en particulier avec la p température et l'humidité des matériaux et il faut quand une précision élevée est nécessaire tenir compte de ces variations.

La loi de Fourier permet de déterminer les pertes thermiques par les parois des fours, la distribution de la température dans les parois, la vitesse de montée en température à l'intérieur de ces corps et l'isolation thermique optimale des équipements thermiques.

## 2. 2. 1. Régime Permanent(1)

Lorsqu'un solide est soumis à des conditions aux limites constantes, il finit par s'établir au bout d'un temps plus ou moins long (sa valeur peut être estimée par l'étude du régime variable), un régime permanent est caractérisé par le fait que la température est constante en chaque point.

Les paragraphes suivants donnent quelque-uns des résultats en étudiant ces régimes permanents dans le cas de corps de formes géométriques simple La conductivité est supposé constante.

### 2.2.1.1. Paroi Composite Plane

Les parois des fours à résistances comportant souvent une série de matériaux jouant chacun un rôle spécifique (réfractaire, isolant thermique, ;..) Lorsque ces matériaux constituent des plaques planes parallèles, il est facile d'étudier la transmission de chaleur à cette paroi.

Chaque élément de paroi est traversé par le même flux thermique, ce qui se traduit, si celle-ci comprend n plaques dont les faces extrêmes sont maintenues à des températures  $\theta_1$  et  $\theta_{n+1}$  par :

$$\phi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{e_1/\lambda_1 S} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{e_2/\lambda_2 S} = \dots = \frac{\theta_n - \theta_{n+1}}{e_n/\lambda_n S} \quad 2.6$$

soit en additionnant :

$$\phi = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{\sum e_i/\lambda_i S} \quad 2.7$$

L'expression,  $R = \frac{e_i}{\lambda_i S}$  est appelée par analogie avec la conduction électrique, résistance thermique. La résistance thermique d'une paroi composite plane est égale à la somme des résistances thermiques élémentaires

La variation de température lors de traversée d'une plaque est proportionnelle à sa résistance thermique.

$$\theta_i - \theta_{i+1} = \Phi \frac{e_i}{\lambda_i S} \quad 2.8$$

Dans la plaque de rang  $i$ , la répartition de la température est donnée si  $x$  désigne la distance à la plaque de rang  $i$  (voir figure 7)

$$\theta_x = \theta_i - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R S} \cdot \frac{x}{\lambda_i} \quad 2.9$$

La courbe de répartition de température est donc constituée de segment de droite dont les coefficients angulaires sont inversement proportionnels à des matériaux formant les différents éléments de la paroi

Cette analyse montre l'importance de dans la transmission de la chaleur par conduction, des valeurs faibles caractérisent les isolants thermiques, des valeurs élevées les bons conducteur de la chaleur. Le tableau de la figure 5 donne a titre indicatif la conductivité thermique de quelque matériaux.

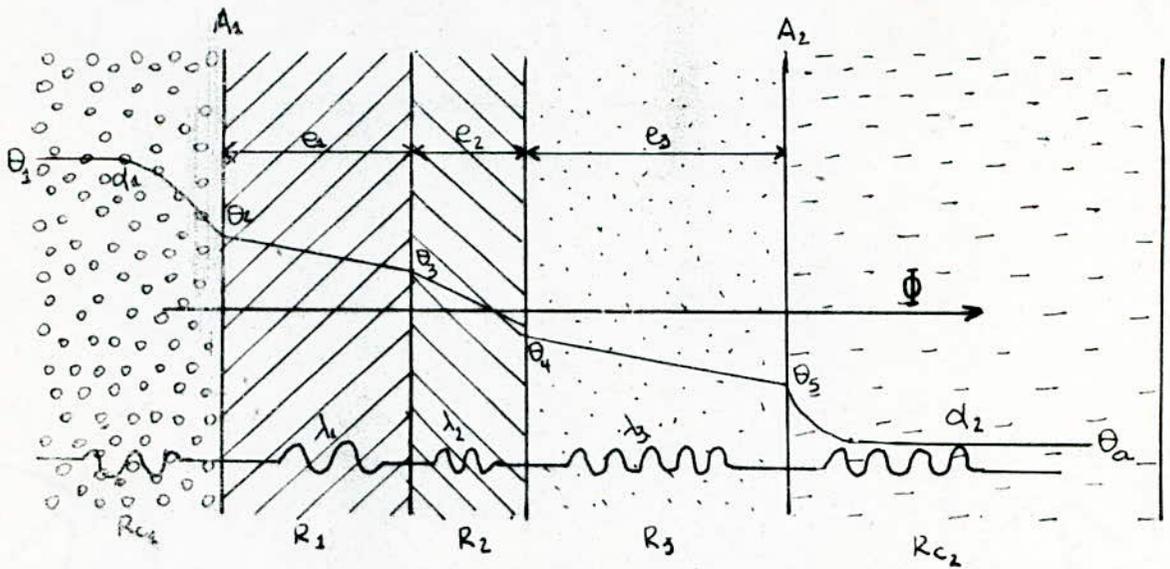


FIG 5 Transmission de chaleur dans une paroi composite plane.

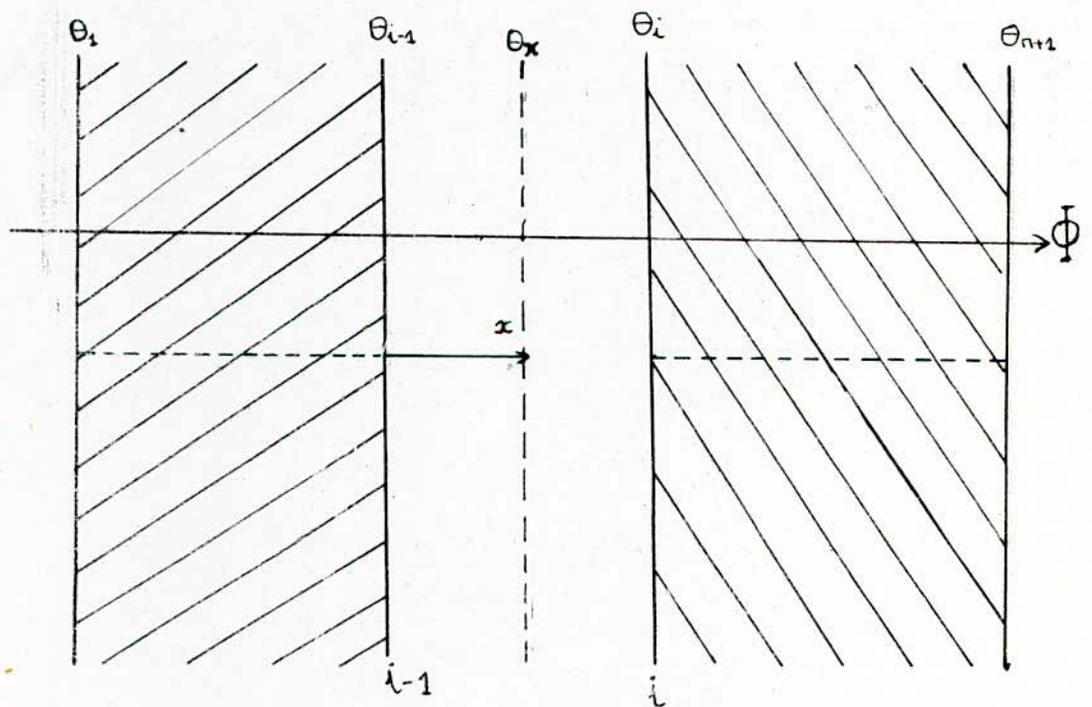


FIG 6 Repartition de la temperature dans une couche de rang i.

### 2.1.1.2 Paroi Composite Cylindrique

Dans le cas de 2 surfaces cylindriques concentriques indéfinies de rayon  $r_1$  et  $r_2$  maintenues respectivement aux températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$  le flux de chaleur par unité de longueur s'exprime par :

$$\Phi = 2\pi\lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad 2.10$$

La résistance thermique par unité de longueur du tube est alors :

$$R = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda} \quad 2.11$$

Elle peut être exprimée sous une forme analogue à celle trouvée pour la paroi plane, soit  $R =$   
à condition de poser

$$S = \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{S_2 \cdot S_1}{\ln S_2 \cdot \ln S_1} \quad 2.12$$

pour un tube cylindrique composite comprenant  $n$  couches, l'expression du flux thermique par unité de longueur devient alors (voir figure 8)

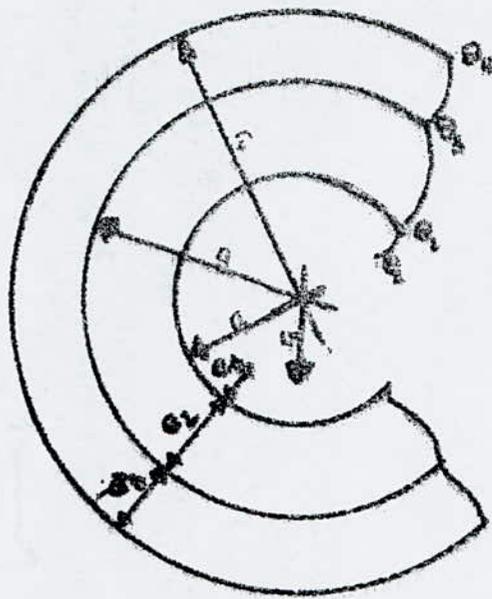


Fig. 8. Flux de chaleur dans une paroi cylindrique composite.

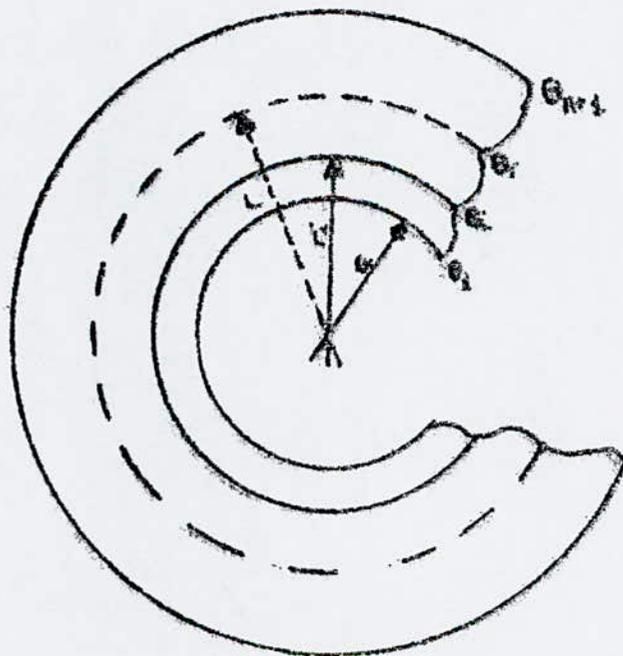


Fig. 9. Repartition de la température dans une couche de rang  $i$ .

### 2.1.13 Paroi sphérique composite

Pour un solide limité par 2 sphères concentriques, de rayon  $r_1$  et  $r_2$ , et maintenues respectivement à la température  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , le flux de chaleur s'exprime par :

$$\Phi = \frac{4\pi\lambda(\theta_1 - \theta_2)}{(1/r_1) - (1/r_2)} \quad 2.15$$

La résistance thermique de l'enceinte sphérique est donc :

$$R = \frac{(1/r_1) - (1/r_2)}{4\pi\lambda} \quad 2.16$$

Elle peut être exprimée sous forme analogue à celle trouvée pour la paroi plane, soit  $R = \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2}$  à condition de poser :

$$S = \frac{4\pi r_1 r_2}{r_2 - r_1} = \frac{4\pi r_1 r_2}{\Delta r} \quad 2.17$$

Pour une paroi composite comprenant  $n$  couches l'expression du flux thermique devient alors :

$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{R} \quad \text{avec} \quad R = \sum_{i=1}^n \frac{(1/r_i) - (1/r_{i+1})}{4\pi\lambda_i} \quad 2.18$$

*Boite Boite*

L'évolution de la température à l'intérieur d'une couche de rang  $i$  est donné par : (fig. 9)

$$\theta_r = \theta_i - \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{R_{4n} \lambda_i} \left( \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r} \right) \quad 2.19$$

sont

$$\theta_r = \theta_i - \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{RS} \frac{e}{\lambda_i} \quad \text{avec} \quad \begin{matrix} S = 4n \lambda_i \\ e = r - \bar{r}_i \end{matrix}$$

ou :



#### 2.1.1.4 Cas Générale

Les équipements thermiques utilisés dans la pratique industrielle ont souvent des formes relativement complexes. Les fours se rapprochent toutefois généralement de la forme parallélépipédique.

Les déperditions thermiques des fours et autres équipements thermiques étant calculées par unité de surface des parois, il faut multiplier celle-ci par la surface de chaque paroi homogène pour obtenir ses déperditions thermiques.

### 2.2.2 Régimes Variables (1)

La conduction de la chaleur en régime variable intéresse essentiellement le chauffage d'une charge dans un four, l'échauffement des parois des fours et la récupération de chaleur. Il faut alors revenir à l'équation générale

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \rho} \Delta \theta \quad 2.20$$

$\Delta$  Le LAPLACIEN

La signification de la diffusivité thermique  $a = \frac{\lambda}{c \rho}$  apparaît alors clairement. La chaleur spécifique  $C$  et la masse volumique freinent l'échauffement d'un corps, celui croissant de façon inverse avec leur valeur, tandis que la vitesse à laquelle se propage une élévation de température est proportionnelle au coefficient de conductivité thermique

L'étude mathématique de ces régimes variables est dans le cas générale, extrêmement complexe. A titre d'exemple, le cas d'un corps semi-infini limité par une surface plane dont la température à l'instant initial est uniforme ( $\theta = \theta_0$ ). Au temps  $t = 0$ , la surface du corps est brusquement portée à la température  $\theta_1 = \theta$  et maintenue à cette température.

L'intégration de l'équation différentielle précédente permet en tenant compte des conditions initiales et aux limites, de déterminer l'évolution de la température en fonction du temps et de la distance  $x$  à la surface, (figure 1)

$$\frac{\theta - \theta_0}{\theta - \theta_0} = 2 G \left( \frac{x}{\sqrt{2 a t}} \right) \quad 2.21$$

G désignant la fonction de Galton (intégrale de la courbe de Gauss), défini par :

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad 2.22$$

Si la surface du corps est portée à la température  $\theta_1$ , la loi de variation de la température devient

$$\frac{\theta - \theta_1}{\theta_0 - \theta_1} = 2 G\left(\frac{x}{\text{Vat}}\right) \quad 2.23$$

### 3. La Convection (1)

La convection caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide, gaz ou, liquide dont les molécules sont en mouvement. Ce phénomène est fondamental pour l'étude des échanges de chaleur dans les fluides mais aussi entre fluides et solide. L'échange de chaleur est d'autant plus intense que l'agitation du fluide est plus marquée. Deux types de convection sont généralement distingués :

- La convection forcée, dans laquelle le mouvement du fluide est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques, son but étant d'accélérer le transfert de chaleur ;
- La convection naturelle, dans laquelle le mouvement du fluide est provoqué par les différences de température entre le solide et le fluide ou entre les différents du fluide.

L'étude de la transmission de la chaleur est étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides.

### 3.1. Coefficient de Convection

Le flux de chaleur échangé entre un solide et l'ambiance à travers une surface élémentaire entourant un point de la surface de ce solide s'exprime par

$$d\phi = \alpha ds (\theta_a - \theta_s) \quad 3.1$$

$\phi$ , flux de chaleur en watt

S, surface d'échange en m<sup>2</sup>

$\theta_a$ , température ambiante en degrés celsius

$\alpha$ , Coefficient de convection en watts par mètre carré par degré celsius.

Le coefficient de convection thermique ne constitue pas une constante absolue, mais dépend de très nombreux facteurs tels que :

- Les caractéristiques du fluide : coefficient de conduction, chaleur spécifique, masse volumique, viscosité, vitesse, température ;
- La nature de l'écoulement : turbulent ou laminaire
- Les caractéristiques de la paroi : angle d'attaque de la paroi par le fluide.

L'étude de la convection est largement expérimentale et utilise un certain nombre de grandeurs sans dimensions caractérisant les fluides d'un point de vue physique et thermique (nombre de Nusselt, Stanton, Peclet...) dont le but est de relier l'échange de chaleur à des grandeurs accessibles et de favoriser le raisonnement par similitude.

De nombreuses formules empiriques comme à titre d'exemple, l'expression suivante donnent en fonction de ces grandeurs

N 
$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = C F_r^m Re^n Gr^p \left(\frac{L}{d}\right) \quad 3.2$$

Nu =  $\alpha d / \lambda$  nombre de Nusselt ;

Pr =  $\nu / \alpha = \eta c / \lambda$  nombre de Prandtl

Re =  $\omega d / \nu$  nombre de Reynolds ;

Gr =  $(d^3 g \beta (\theta_a - \theta_s)) / \nu^2$  nombre de Grashoff ;

$\alpha$ , coefficient de convection en watts par mètre carré par degré celsius ;

$d$ , dimension caractéristique, par exemple diamètre d'un tube en mètres ;

$L$ , longueur caractéristique, par exemple, longueur d'un tube en mètres ;

$\eta$ , viscosité dynamique égale à  $\nu \rho$  en kilogrammes par mètre par seconde ;

$\omega$ , vitesse du fluide en mètres par seconde ;

$g$ , accélération de la pesanteur en mètres par seconde carrée ;

$\beta$ , coefficient de dilatation volumique du fluide, en ( $^{\circ}C$ )

$T$ , température absolue en  $^{\circ}K$

$\theta_a - \theta_s$  ; différence de température fluide paroi en degré celsius ;

$C$ , constante ;

$m, n, p, q$ , exposants d'origine expérimentale.

$\nu$ , VISCOSITE cinématique en mètre carré par seconde.

### 3.2. Transfert de chaleur par convection

Le coefficient de convection varie dans des proportions considérables :

- pour les gaz de 2 à 100 W/m<sup>2</sup> °C
- pour les liquides sans changement d'état de 100 à 200 W/m<sup>2</sup> °C
- pour les fluides se condensant ou se vaporisant, de 1000 à 50.000 W/m<sup>2</sup>, °C

Le coefficient de convection est avec les gaz souvent très faible.

Une bonne approximation du coefficient de convection en air calme est donnée par des parois planes, par :

$$\alpha = A (\theta_2 - \theta_3)^{0,25}$$

3.3

avec

A = 1,8 pour les parois verticales ;

A = 1,3 pour les parois horizontales dirigées vers le bas

A = 2,5 pour les parois horizontales dirigées vers le haut.

Un processus d'échange de chaleur par convection est représenté sur la figure 11, montrant une plaque dont les surfaces latérales A1 = A2 = A sont en contact avec les fluides de propriétés différentes.

### 3.3 TRANSMISSION DE CHALEUR (2)

#### Régime Permanent

Si le corps solide, représenté sur la figure 12 est constitué de plusieurs couche d'épaisseur  $e$  et de coefficient de conduction thermique différents et si l'on veut étudier un phénomène de transmission de chaleur dans les cas représentés dans la figure..... les hypothèses et les calculs seront facilités par l'introduction de la notion de coefficient global de transmission de chaleur.  $K$

On peut ainsi grouper l'influence des coefficients de transmission de chaleur par conduction et par convection thermique ainsi que celle des épaisseurs de paroi lorsqu'on est en présence de différentes couches parallèles.

Le flux de chaleur  $\phi$  qui traverse cet ensemble, se calcule à partir de la formule :

$$\phi = k S (\theta_1 - \theta_2) \quad 3.4.$$

dans laquelle le coefficient global de transmission de chaleur  $K$  a pour valeur :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad 3.5$$

La résistance thermique s'écrira

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad 3.6$$

Dans le cas d'un corps solide constitué de n couches, dont l'épaisseur de paroi e et le coefficient de conduction thermique ont des valeurs différentes, on cite alors :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{en}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} \quad 3.7$$

Un cas qui se présente fréquemment dans la pratique concerne des couches coaxiales, ayant des épaisseurs et des coefficients de conduction thermique différents cette disposition coaxiale est représentée dans la figure 11.

d1 est le diamètre intérieur, dn + 1 le diamètre extérieur d'un tube, constitué de n couches coaxiales.

la résistance thermique globale s'écrit :

Dans le cas d'un corps solide constitué de n couches, dont l'épaisseur de paroi e et le coefficient de conduction thermique ont des valeurs différentes on cite alors :

$$\frac{1}{K_R} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}} + \sum \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} \quad 3.7$$

Cette formule exprime la résistance thermique par unité de longueur, on peut une longueur de tube L, déterminer le flux de chaleur  $\phi$  par la relation suivante.

Un cas qui se présente fréquemment dans la pratique concerne des couches coaxiales, ayant des épaisseurs et des coefficients de conduction thermique différents.

$$\phi = K_R \pi L (\theta_1 - \theta_2) \quad 3.9$$

figure 11.

d1 est le diamètre intérieur, dn + 1 le diamètre extérieur d'un tube, constitué de n couches coaxiales.

#### 4 Rayonnement : (3)

Le rayonnement caractérise l'échange directe entre deux corps à températures différentes séparés par un espace transparent à ce rayonnement.

Un exemple très caractéristique de ce mécanisme nous est fourni par le rayonnement solaire qui nous parvient après avoir parcouru une distance considérable dans le vide spatial.

Comme on le constate dans la figure ....., ce rayonnement n'occupe qu'une très faible portion du spectre des ondes électromagnétiques, située dans une fourchette de longueurs d'onde allant en gros de 0,1 à 100 microns ( ) Dans ce domaine nos sens sont capables de percevoir le rayonnement sous la forme d'une sensation de chaleur.

La transmission de chaleur par rayonnement entre les surfaces de deux solides obéit à la loi de STEFAN - BOLTZMANN, qui s'exprime ainsi :

$$\Phi = \epsilon F S (T_1^4 - T_2^4) \quad 3.10$$

$\Phi$ , flux de chaleur transmis en watts ;

$T_1$ , température de la surface émettrice en degré Kelving

$T_2$ , température de la surface receptrice en degré kelving

constante de STEFAN égale à  $5,73 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$S$ , aire de la surface émettrice ;

$\epsilon$ , Coefficient mutuel de rayonnement

$F$ , Facteur d'angle de la surface réceptrice par rapport à la surface émettrice.

Le coefficient mutuel de rayonnement dépend essentiellement des propriétés de surface des corps en regard en matière d'émission et d'absorption du rayonnement, mais aussi de leur forme et de leur position relative.

Le facteur d'angle n'est fonction que de la forme des surfaces et de leur position l'une par rapport à l'autre.

La transmission de chaleur par rayonnement revêt une importance primordiale en électrothermie industrielle.

Le chauffage par rayonnement occupe une place très importante dans les fours à résistances.

Le coefficient mutuel de rayonnement dépend essentiellement des propriétés de surface des corps en regard en matière d'émission et d'absorption du rayonnement, mais aussi de leur forme et de leur position relative.

Le facteur d'angle n'est fonction que de la forme des surfaces et de leur position l'une par rapport à l'autre.

La transmission de chaleur par rayonnement revêt une importance primordiale en électrothermie industrielle.

Le chauffage par rayonnement occupe une place très importante dans les fours à résistances.

CHAPITRE " 3 "

LE CHAUFFAGE PAR RESISTANCES

APPLICATION AUX FOURS ELECTRIQUES

## 1 - PRINCIPE DE CHAUFFAGE DES FOURS A RESISTANCE

### 1-1 PUISSANCE DISSIPEE DANS UNE RESISTANCE (1)

Le chauffage des fours à résistances repose sur la loi de joule .

Toute substance conductrice de l'électricité traversée par un courant électrique est le siège d'un dégagement de chaleur.

La puissance électrique transformée en chaleur s'exprime par la relation.

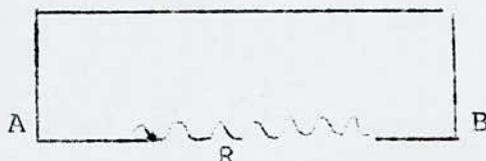
$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

P en watts (W)

U en Volts (V)

I en Ampères (A)

R en Ohms ( )



Principe de chauffage par résistance

Le principe des fours électriques à résistances est extrêmement simple, schématiquement, ceux-ci sont constitués d'une enceinte chauffée par des résistances électriques. Cette enceinte, souvent appelée chambre de chauffe ou laboratoire, doit être très bien calorifugée afin de réduire le plus possible ces déperditions thermiques. La charge à chauffer est placée dans cette enceinte (Voir fig. 9).

.../...



Fig 9. Représentation schématique d'un four à Résistances.

L'étude d'un four comporte l'analyse des points suivants :

- Production de la chaleur;
- Transmission de la chaleur;
- Utilisation de la chaleur
  - . Absorption de la chaleur de la substance à traiter
  - . Pertes thermiques et rendement du four.

## 2 - Constitution et caractéristiques des fours à résistance

Les fours à résistance comprennent essentiellement :

- Une chambre de chauffe recevant la charge, celle-ci étant constituée dans la plupart des cas de matériaux réfractaires ou semi-réfractaires. Des matériaux isolants placés contre les réfractaires assurent le calorifugeage du four; certains matériaux réfractaires sont également d'excellents isolants thermiques (produits à base de fibre réfractaire céramiques);
- Une carcasse généralement métallique assurant la rigidité du four (casin);
- des résistances électriques constituant le corps de chauffe et leur dispositif d'alimentation;
- des systèmes de régulation de la température et de manutention de la charge;
- des dispositifs auxiliaires, turbines de recyclage de l'air pour les fours à convection forcée, générateurs d'atmosphères particulières.

### 2.1 Transmission de la chaleur dans un four à résistances

Dans un four à résistances, la transmission de la chaleur se fait selon les lois rappelés dans le chapitre deux (2) c'est à dire par :

- Convection
- Rayonnement
- Conduction.

Au cours d'un cycle complet de traitement dans un four électrique, on se trouve en présence de trois catégories principales de transferts thermiques :

- Transferts de chaleur du corps de chauffe vers la charge et le four (refractaire calorique et structure métallique) : chauffage du four tant pour la mise en température que pour la marche en régime permanent;

- Transfert de chaleur de la charge chauffée vers la masse du four et à partir de la masse vers l'extérieur : refroidissement naturel de la charge et du four;

D'une façon générale, le chauffage se fait par transmission de chaleur entre les résistances et la charge, mais les parois jouent un grand rôle puisqu'elles réémettent la majeure partie de l'énergie reçue du corps de chauffe (1), (4), (2),

#### 2.1.1. Transfert de chaleur par conduction

Ce mode de transmission conditionne

- La transmission d'énergie à l'intérieur de la charge et l'égalisation de sa température;
- Les pertes thermiques par les parois du four

Les parois du four doivent donc être constituées de matériaux réduisant le plus possible les pertes thermiques. Quand à la conduction thermique à l'intérieur de la charge, elle peut amener à limiter, en particulier pour des produits de mauvaises conductivités thermiques ou de formes complexes, l'intensité du flux thermique afin de réduire le gradient thermique dans la charge et de diminuer ainsi les risques de formation et de surchauffe locale.

#### 2.1.2 Transfert de chaleur par rayonnement

Ce mode de transfert de la chaleur est fondamental dans les fours électriques travaillant à haute température.

supérieure à  $500^{\circ}$  environ. A partir de cette température l'échange thermique entre les résistances et la charge se fait en effet essentiellement par rayonnement et, au delà de  $750^{\circ}$  C, pratiquement de cette seule manière. Le transfert de chaleur s'opère, soit directement entre les résistances et la charge, soit indirectement par réflexion sur les parois du four ou par réémission de ces parois portées à haute température.

Les échanges thermiques entre les résistances, la charge et les parois obéissent à toutes les lois du rayonnement, notamment celle de STEFAN-BOLTZMANN, PLANK et WIEN.

Le paragraphe.....consacré au calcul des résistances illustre les points particulier concernant l'application de ces lois en particulier de celle de STEFAN BOLTZMANN

### 2.1.3. transfert de chaleur par convection

La convection joue un rôle important surtout dans les fours étuves fonctionnant à basse température ce mode de transfert d'énergie, en particulier la convection forcée, peut assurer des densités de puissances plus élevées que la rayonnement et une excellente homogénéité de température.

La convection forcée peut être de deux natures :

- Un simple brassage mécanique de l'atmosphère entourant la charge essentiellement destinée à homogénéiser sa température;
- Une circulation dirigée de l'atmosphère venant lecher successivement les résistances et la charge afin d'accélérer le transfert thermique tout en assurant une excellente homogénéité de température.

### 2.1.4 Echange thermique global dans un four à résistances.

En pratique, le transfert de chaleur se fait simultanément par rayonnement et convection, le fluide assurant la convection étant l'air ou l'atmosphère particulière régnant dans le four.

La figure .40....montre toutefois que dans un four à résistance le rayonnement occupe toujours une place importante.

On peut dire, que du point de vue transfert thermique il existe deux grandes familles de fours à résistances recourant à des technologies différentes :

- Les fours à rayonnement pour les hautes températures supérieures à 600° C environ;
- Les fours à convection forcée pour les températures basses et moyennes, jusqu'à 700 - 750° C environ;

## 2.2. Calcul de puissance d'un four à résistances (1)

L'énergie émises par les corps de chauffe sert à :

- Elever la température de la charge à la température requise;
- Chauffer les matériaux constituant l'enceinte;
- Compenser les déperditions thermiques du four.

Le bilan thermique simplifié et la puissance à installer dans un four à résistance constituent donc des grandeurs très faciles à évaluer.

### 2.2.1 Energie absorbée par la charge.

La quantité de chaleur à fournir à un produit est généralement égale à la somme de :

- La chaleur sensible  $Q_1$  nécessaire pour porter le corps d'une température  $O_1$  à une température  $O_2$  sans changement d'état; cette énergie est de la forme:

$$Q_1 = MC (O_2 - O_1)$$

2.1

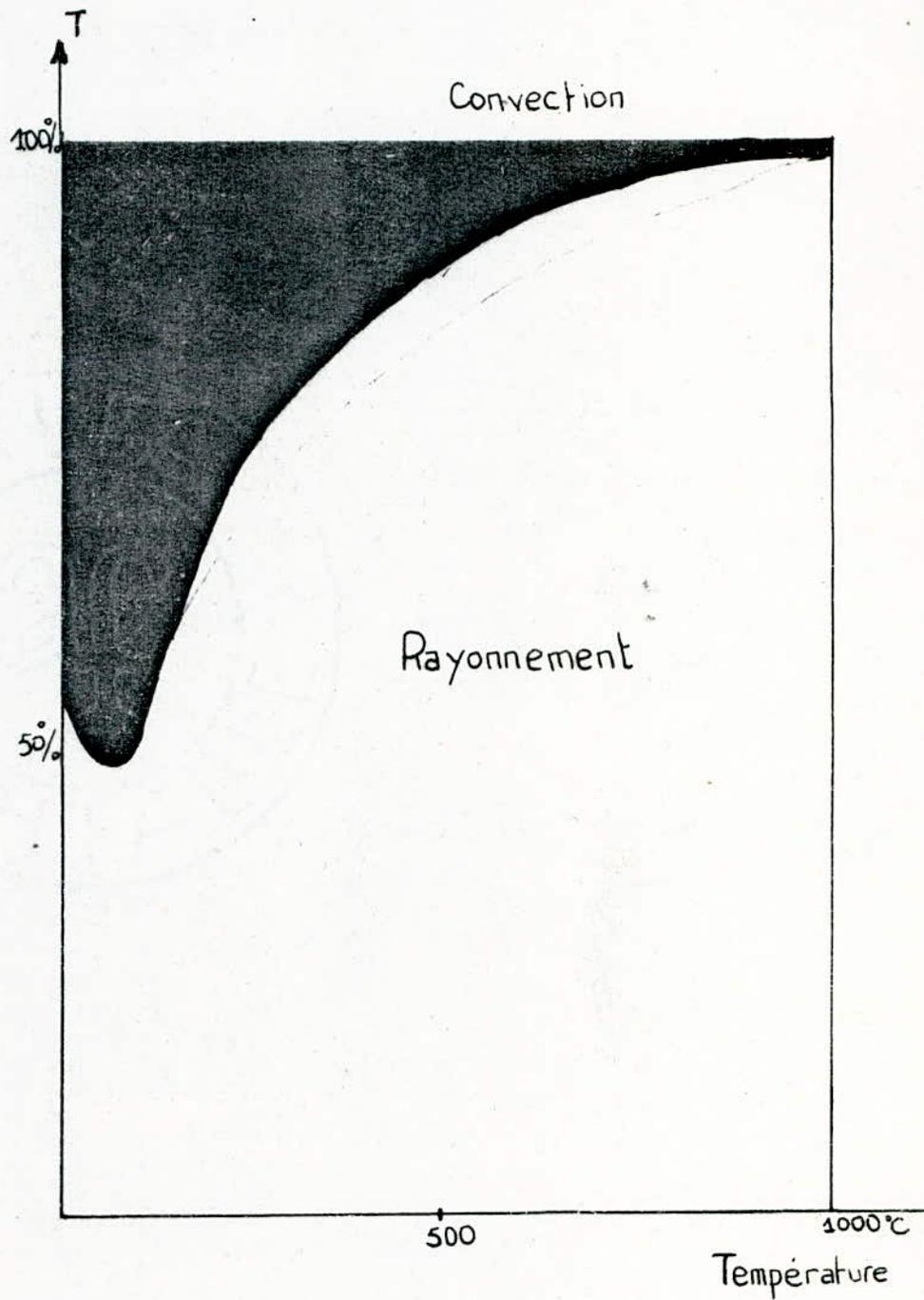


Fig.10. Echange thermique global dans un four à résistance.

Q 1 en kilowattheures;

c, chaleur spécifique moyenne entre O1 et O2 en kilowattheures par kilogrammes par degré celsius.

O1 et O2, température initiale et finale des corps à chauffer en degré celsius;

- la chaleur latente Q2 nécessaire aux changements d'état éventuels (fusion, évaporation):

$$Q_2 = m_2 L$$

Q2; en kilowattheures

L, chaleur latente de changement d'état en kilowattheures par kilogrammes.

m2, masse de la partie de la charge subissant un changement d'état en kilogrammes.

### 2.2.2. énergie absorbée par les parois.

Cette énergie peut être calculée à partir de la capacité calorifique mci de chacun des matériaux constituant les parois et du profil de température de celle-ci lorsque l'équilibre thermique est atteint la chaleur emmagasinée dans les parois joue le rôle température dans tout le volume de l'enceinte et évite des variations de températures trop brutales. Lors du refroidissement du four, l'énergie accumulée dans les parois se perd partiellement ou totalement (en cas d'arrêt prolongé).

### 2.2.3 déperditions thermiques des fours.

3.7 Ces déperditions thermiques se répartissent entre :

- Les pertes par conduction thermique à travers les parois

En raison du gradient thermique existant entre l'enceinte du four et l'ambiance, un flux de chaleur s'écoule à travers les parois du four.

La transmission de chaleur se fait par conduction dans les parois, puis par rayonnement, conduction et convection à partir des parois extérieures du four.

- Les pertes par les ouvertures.

Ces pertes se décomposent entre

- . Les pertes dues aux ouvertures de portes, elles peuvent être très importantes pour les traitements exigeant des ouvertures fréquentes (fours d'émailage par exemple).

- . Ces pertes par les fentes (fissures, portes mal fermées, mauvaise étanchéité)

Une conception soignée et une maintenance régulière permettent de réduire facilement ces pertes dans les fours à résistance.

Ces pertes sont difficiles à évaluer avec précision car souvent apparaissent souvent avec le vieillissement du four, le manque d'entretien ou manque de rigueur dans l'exploitation.

Toutes ces pertes peuvent généralement être fortement réduites grâce à une analyse rigoureuse de leur causes et à des mesures simples (isolation thermique, maintenance des fours, surveillance de l'étanchéité, réduction de la dimension de certains orifices...)

### - Puissance à installer

Le calcul approché de la puissance d'installer est très simple; il diffère légèrement pour les fours continus et discontinus.

#### 2.2.4.1. Fours intermittents ou discontinus.

La puissance est obtenue par la relation.

$$W_1 = \frac{C_1 + C_2 + a D}{t}$$

$W_1$ ) puissance à installer en kilowatts;

$C_1$ ) chaleur nécessaire à l'élévation en température de la charge et, éventuellement, à son changement d'état, en kilowattheures,

$C_2$ , chaleur accumulée dans les parois du four, en kilowattheures;

$D$ , déperditions thermiques à la température finale du four en kilowatts; (régime permanent).

$a$ , Coefficient tenant compte de la valeur des déperditions pendant la montée en température; (régime variable)

$a$  est généralement compris entre 0,6 et 0,8;

$t$ , durée de montée en température en heures.

Le coefficient  $a$  peut être calculée de façon plus précise en construisant un modèle du four et en suivant son évolution dans le temps.

#### 2.3 Rendement des fours à résistances (1) (4)

Bien définir la notion de rendement est absolument indispensable pour évaluer correctement les performances thermiques et économiques des fours à résistances.

### 2.3.1. Rendement électrique

C'est le rapport  $\eta_e = Q_2 / Q_1$  de l'énergie électrique  $Q_1$ , transformée en énergie thermique dans la chambre de chauffe, à l'énergie électrique fournie au four.

La différence  $Q - Q_1$  est égale à la somme des pertes électriques dans les lignes d'amenées de courant ainsi que dans les appareils de transformation de la tension et de réglage.....

Ce rapport de conversion est généralement très élevé, il est de l'ordre de 95%

### 2.3.2. rendement thermique

C'est le rapport  $\eta_t = Q_2 / Q_1$  de l'énergie thermique  $Q_2$ , emmagasinée en fin d'opération thermique dans la charge traitée, à l'énergie électrique  $Q_1$  transformée en chaleur dans la chambre de chauffe. La différence  $Q_1 - Q_2$  représente les pertes du four.

est un rendement opératoire car il est essentiellement fonction de :

- La construction du four (type de four, matériaux réfractaires et isolants, régulation, formes dimension....),
- L'utilisation du four (poids, caractéristiques physiques, thermiques et chimiques des matériaux à chauffer; durée de traitement, taux de charge du four, nature du traitement, mode de fonctionnement,.....)

Certains de ces critères peuvent d'ailleurs servir à définir des rendements thermiques particuliers comme par exemple, le rendement à pleine charge.

.../...

## 2.4. Les différents types de fours à résistances (1)

La classification des fours à résistances peut reposer sur de nombreux critères

- Nature des résistances.

Fours à résistances métalliques, à cermets, à résistances non métalliques, à résistances solides ou liquides, en grains ou en morceaux, en fils ou en rubans enroulés, à tubes radiants.....

Le choix dépend essentiellement du niveau de température, de la densité de puissance recherchée, de l'atmosphère et du type d'application.

- Mode d'utilisation du four.

continu (chauffage au défilé) ou discontinu (charge fixe ou statique);

Le mode de fonctionnement dépend essentiellement de la production à assurer, de la forme et de la nature des charges, de la durée des cycles thermiques....

- Mode de manutention :

tapis continu, vibration, vis hélicoïdale, longerons mobiles....

- Nature de l'atmosphère et du milieu atmosphère normale (air), atmosphère contrôlée, vide milieu liquide, bain fluidisé...

Ces atmosphères assurent la protection du matériau ou jouent un rôle chimique

- mode de transmission de la chaleur.

rayonnement, convection.....Le mode de chauffage est essentiellement fonction de la température désignée mais également de la précision de température recherchée.

- Position des résistances par rapport à la charge :

rayonnement direct, indirect (four mouflé, four à creuset)

.../...

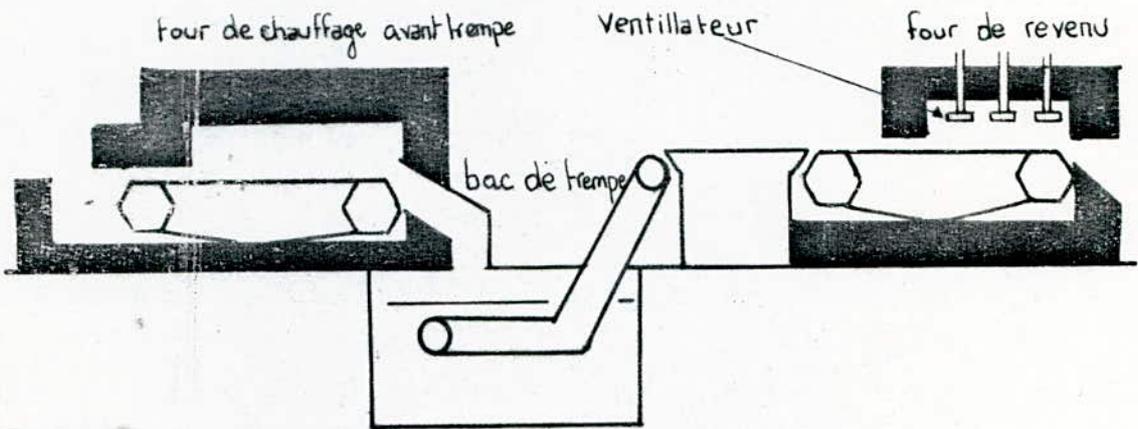


Fig. 11. Ligne continue de traitement thermique de pieces en acier avec un four de chauffage avant trempe et four de revenu à convection forcée.

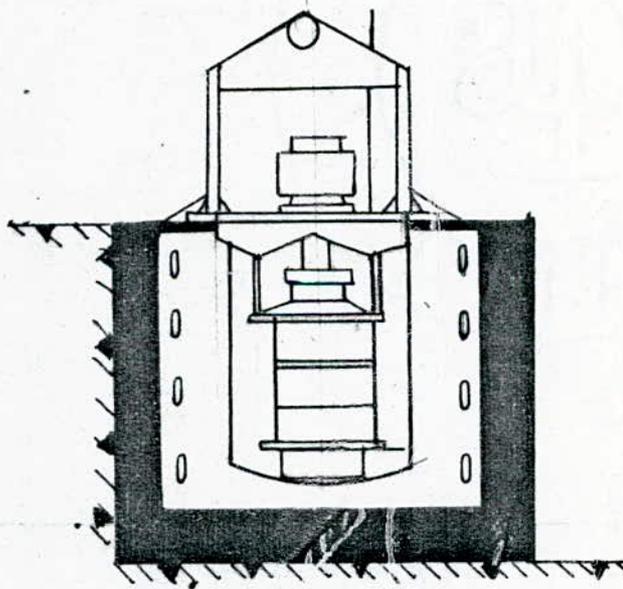


Fig. 12. Four à pot mouflé pour cémentation gazeuse, carbonituration revenu, recuit.

## 2.3. Destination du Four

Four de rchauffage, de traitement thermique, de cuisson, de polymérisation, de stabilisation, de fusion, étuves;.....

- Forme du four.

À chambre, à sole mobile, puit, à creuset, élévateur  
à tambour, à cloche.....

### 2.4.1. Types de fours.

Parmi les fours les plus employés, il faut citer

- pour les demi produits (fils, bandes, tubes, barres,  
profilés.....)

- . Les fours à élévateurs
- . Les fours continus à longerons (pas de pelerin),
- . Les fours à tubes mouflés (traitement de barres, tubes, fils...)
- . Les fours à rouleaux commandés,
- . Les fours à port,
- . Les fours à sole fixe ou mobile,
- . Les fours continus à traction (tôles, fils....)
- . Les fours à pousseuses;

- Pour les pièces brutes (pièces moulées, forgées, mécano soudées...)

- . Les fours à sole fixe ou mobile
- . Les fours à élévateur;
- . Les fours à tablier métallique,
- . Les fours à cloche,
- . Les fours puits,

- Pour les pièces mécaniques :

- . Les fours à tablier
- . Les fours verticaux à pôt
- . Les fours à sole vibrante. c (voir fig. \*11,12,13,14.)

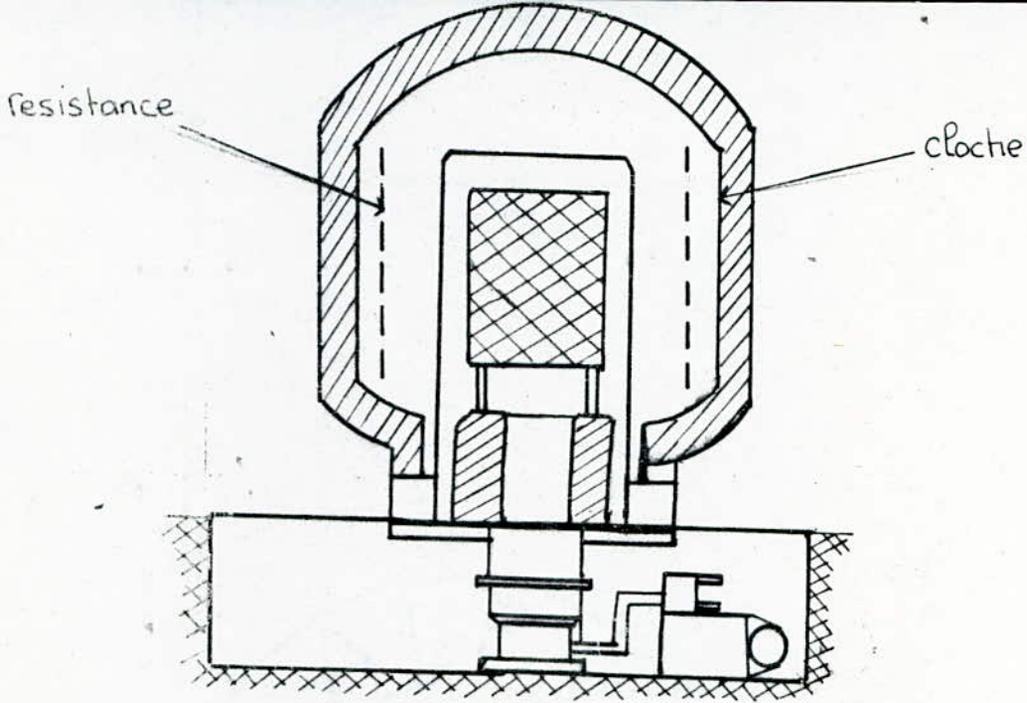


Fig.13. Four à cloche sous vide à paroi chaude.

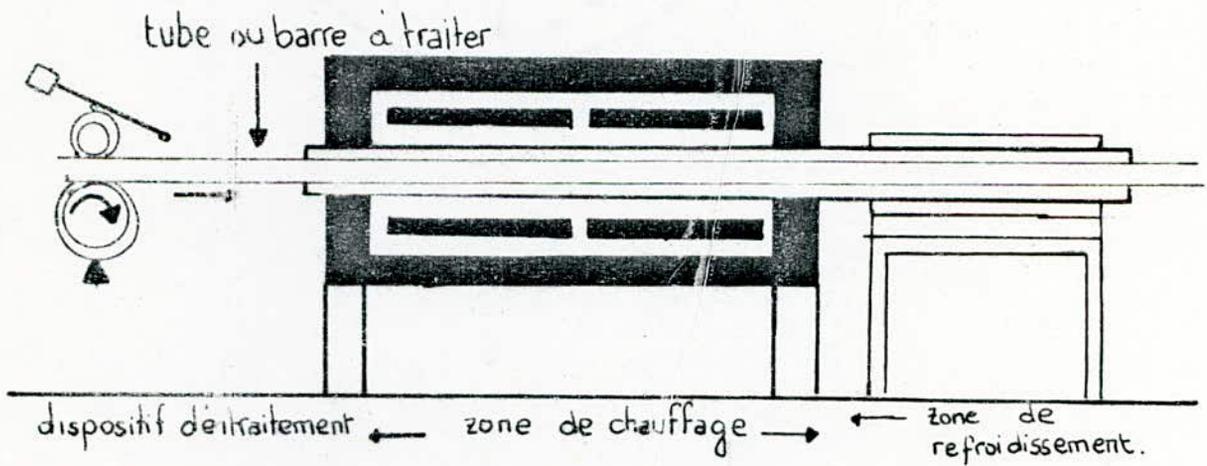


Fig.14. Four à tube mouflé pour le traitement des tubes, fils, barres, ...

- . Les fours continus ou discontinus à bac de trempe incorporé,
- . Les fours à chambre à convection forcée ou non;
- . Les fours verticaux mouflés ou non,
- . Les fours puits
- . Les fours à cornue rotative.

## 2.5 Les refractaires et les isolants : la chambre de chauffe

Un four doit permettre la réalisation, dans les meilleures conditions, du cycle de chauffage d'une charge.

Le rôle de la chambre de chauffe consiste alors à :

- empêcher la chaleur de se dissiper à l'extérieur afin de

- . permettre d'atteindre la température de charge souhaité
- . assurer un rendement thermique optimal pour l'opération considérée, ce qui exige une capacité calorifique et une conductivité thermique des parois aussi réduites que possible;

- constituer en complément des éléments chauffant, une réserve thermique afin de :

- . maintenir un flux élevé de chaleur vers la charge à traiter,
- . assurer une meilleure répartition de la chaleur grâce à la réémission thermique des parois.

matériaux refractaires et matériaux isolants constituent l'essentiel de la paroi composite d'un four; ceux-ci remplissent deux rôles bien distincts.

### 2.5.1 Les refractaires

Par convention, les produits refractaires sont des matériaux minéraux non métalliques dont le point de fusion (ou plus exactement le point de ramolissement, notion définie à partir de la résistance pyroscopique du matériau grâce à des essais normalisés) est supérieur à 1500° C.

.../...

Désignation du calorifuge	Conductivité $\lambda$ à 0 °C (W/m.°C)	Poids spécifique (Kg/m <sup>3</sup> )
Amiante	0,14	5'76 <sup>(1)</sup>
Carbonate de magnésium	0,056	250 <sup>(2)</sup>
Laine de laitier	0,03-0,06	120-250
kieselguhr (brique cuite)	0,08	180-250 <sup>(4)</sup>
Béton cellulaire	0,06-0,2	260-900
Laine de verre	0,056	220
Liège aggloméré	0,06	250-300 <sup>(3)</sup>
Laine	0,037	136
kapok	0,034	18
Feutre	0,031	120
Eau	0,50	1000
Air sec en mouvement	0,120	1,3
Air sec Air immobile	0,026-0,035	1,3

(1) Résiste à 800 °C. Amiante:  $4S_iO_2 \cdot 3MgO \cdot CaO$ .

(2) Jusqu'à 300°C.

(3) Au dessous de 120°C.

(4) le Kieselguhr est un silicate hydraté.

FIG. 16. Caractéristiques moyennes de quelques isolants thermiques.

Refractaire	Base	Temperature de fusion °C
Silice	$\text{SiO}_2$	1 700
Argile	$2 \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{H}_2\text{O}$	1 700
Sillimanite	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$	1 800
Alumine, Bauxite	$\text{Al}_2\text{O}_3$	2050
Fer chromé, chromite	$\text{FeO}, \text{Cr}_2\text{O}_3$	2 000
Carbone	C	3 000
Carbure de silicium	$\text{SiC}$	2500
Magnésie	$\text{MgO}$	2 800
Dolomie	$\text{CO}_3\text{Ca} \cdot \text{CO}_3\text{Mg}$	2 300
Zircon	$\text{SiO}_4\text{Zr}$	2 000
Zircone	$\text{ZrO}_2$	2 400-2 500

FIG. 15. Caracteristiques de quelques produits refractaires courants.

3.12 - Ces matériaux constituent le garnissage situé en face chaude des parois des fours (1) (4) (5)

### Les qualité

Les qualités optimales requises pour les réfractaires sont de nature :

- Thermique : les températures de ramollissement et de fusion doivent être élevées, largement supérieures à celles d'emploi du four; de plus leur capacité calorifique et surtout leur conduction thermique doivent être aussi faible que possible;

- mécanique :

Ces matériaux doivent présenter une excellente résistance mécanique à la température d'emploi; il doivent en particulier résister à des efforts de compression et de traction, à des chocs thermiques consécutifs et à des variations de température brutales.

- Chimiques

Ils doivent posséder une résistance élevée aux actions chimiques provenant, en particulier, de certaines atmosphères, des charges ou des matériaux constituant les résistances et, inversement, ne pas attaquer chimiquement ceux-ci;

- électrique :

La résistance d'isolement électrique doit être élevée même aux températures élevées;

- morphologique :

Au tant que possible, ces matériaux doivent pouvoir être élaborés sous des formes et des dimensions très variées;

- économique :

Leur coût doit bien sûr être maintenu à un niveau faible compatible avec une bonne rentabilité du four.

.../...

Ces matériaux se présentent sous la forme de réfractaires façonnés (briques, pièces de forme) et non façonnés (bétons, pisés, coulis..)

Les caractéristiques physiques et thermiques (conductivité, diffusivité, densité, résistance mécanique .....) varient avec la présentation, la consistance et la composition chimique.

L'afnor classe les produits réfractaires de la façon suivante. (voir figure 115)

1°/ - Produit de silice ayant une teneur en  $\text{SiO}_2$  supérieure à 91% avec une teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inférieure à 3%

2°/ - Produit siliceux : teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  comprise entre 93% et 85% , teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  supérieure à 5%

3°/ - Produit à base d'argile.

- produit silico alumineux :

$$15 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 32\%$$

- produit alumineux

$$32 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 < 40\%$$

- produit extra alumineux :

$$\text{Al}_2\text{O}_3 > 40\%$$

4°/ - produits spéciaux :

produits à base de matière extra réfractaire qui constitue l'élément total ou principal.

- Bauxite
- Magnesite et dolomie
- cyanite et sillimanite - mullite
- corindon
- chromite
- Chrome magnesite
- carbure de silicium
- zircon et zircone
- produits électro-fondus
- produits frittés.

.../...

## 1 - 2.5 Les isolants thermiques

Ces matériaux utilisés en face froide des fours, ont avant tout pour but d'assurer leur isolation thermique, leur conductivité thermique doit donc être très faible afin de répondre à cette exigence, ces matériaux présentent une structure cellulaire, poreuse ou fibreuses chaque intervalle d'air (ou de vide) étant de petites dimensions pour éviter tout effet de convection (par convention, un isolant doit posséder une porosité supérieure à 45%).

Pour les faibles températures, il est possible d'utiliser des substances organiques (liège, laine, sciure de bois...) Toutefois, les installations industrielles modernes recourent généralement à des matériaux minéraux (laine de verre, de roche ou de laitiers, argile expansée, réfractaires allégés, vermiculite, produits silico-alumineux, magnésie, amiante, silice...)

Le tableau de la figure 16 donne les caractéristiques de quelques isolants.

### 2.5.3 Les réfractaires isolants :

Les réfractaires isolants peuvent être subdivisés en quatre grands groupes :

- Les réfractaires isolants façonnés (briques, pièce de forme).
- Les bétons réfractaire isolants rigides
- Les réfractaires isolants fibreux,
- Les bétons isolants fibreux et les produits fibreux composites.

Le principal intérêt de ces produits est de permettre des économies d'énergie substantielles.

Parmi tous ces produits, les réfractaires isolant fibreux méritent une mention particulière.

Ils possèdent en effet une conductivité thermique 20 à 40% plus faible que celle d'autres réfractaires.

.../...

isolants comme les briques ou béton, mais surtout une densité cinq à dix fois plus petite.

Aussi permettent-ils souvent avec des fours intermittents des économies d'énergie spectaculaires, de 30 à 60%.

La plus grande partie des réfractaires fibreux céramiques est constituée de mélanges de silice et d'alumine fondus au four électrique à arc.

La température maximale d'emploi est de l'ordre de 1450° C en face chaude pour les réfractaires à 60% d'alumine.

Pour des températures plus élevées, il faut utiliser des fibres à plus de 80% d'alumines ou des fibres de zircon qui permettent des températures de four de plus de 1700°C.

Les matériaux fibreux se présentent sous la forme de fibres en vrac, de nappes, de feutres, de cordons, de bourrelets, de papiers, de pièces.

#### 2.5.4 Refractaires et résistances.

Les supports de résistances sont souvent constitués de matériaux réfractaires.

Ceux-ci doivent présenter des caractéristiques élevées dans le domaine de \$

- La résistance aux agressions chimiques;
- La résistance aux variations de température;
- La résistance au passage du courant et la rigidité diélectrique.

Les matériaux les plus utilisés sont des produits silico-alumineux à haute teneur en alumine (supérieure à 45%).

#### 2.5.5. Epaisseur optimale des parois.

plus l'épaisseur des parois d'un four s'accroît, plus les déperditions thermiques à travers ces parois, pour un type de matériau donné, diminuent. En revanche l'énergie accumulée dans ces parois augmente.

3.17 - En fonction du mode de fonctionnement du four, il existe donc une épaisseur de paroi rendant minimales les pertes totales du four (1) (2)

### 3. Les résistances électriques

C'est l'amélioration continue des matériaux destinés à la fabrication d'éléments chauffants qui a permis le développement du chauffage par résistances électriques.

#### 3.1 Résistance et résistivité.

La valeur R d'un corps de chauffe de longueur l, de section uniforme S et de résistivité est donnée par :

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

3.4

ou  
R, en  $\Omega$   
l, en m;  
S, en  $m^2$   
 $\rho$ , en  $\Omega \cdot m$

La résistance varie en fonction de la température:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta)$$

3.5

$\rho_0$ , résistivité à la température ;  
 $\rho_0$ , résistivité à 0 °C;  
 $\theta$ , température en °C;  
 $\alpha$ , coefficient de température de la résistance en °C<sup>-1</sup>

### 3.2 Critères de choix des résistances.

Le choix de la nature des résistances est fondamental pour l'optimisation des deux paramètres " coût d'investissement" et "durée de vie".

#### - Résistivité :

A puissance constante, une résistivité relativement élevée, permet, à tension donnée de réduire les dimensions du corps de chauffe.

Le coefficient de température  $\alpha$  doit être faible positif et sensiblement constant dans le domaine d'utilisation du four. De plus un coefficient  $\alpha$  positif produit une certaine autoregulation de la puissance dissipée puisque, en cas d'augmentation accidentelle de la température, la valeur de la résistance s'accroît et la puissance dissipée diminue.

#### - Résistance mécanique.

Un coefficient de dilatation faible favorise généralement la résistance mécanique.

Une bonne ductilité permet en particulier d'obtenir des formes très diverses épousant au mieux les surfaces et conduisant d'une transmission optimale de la chaleur.

#### - Résistance aux agressions chimiques

Les matériaux servant de résistances doivent résister aux agressions chimiques provenant des vapeurs ou gaz formant l'atmosphère naturelle ou artificielle du four, des émanations issues des corps en traitement ou des supports réfractaires des corps de chauffe.

### 3.3. Les différents types de résistances

Les éléments chauffants résistifs sont généralement classés en trois grandes familles : (voir figure 179)

- Les résistances métalliques;
- les cermets
- les résistances non métalliques

#### les résistances métalliques

De très nombreux alliages sont utilisés pour la confection des résistances métalliques. Pratiquement, ces résistances peuvent être réparties en trois catégories.

- Les résistances constitués d'alliages ter-nikel-chrome ou nickel-chrome,
- les résistances constitués d'alliages ter-chrome-aluminium,
- les résistances spéciale au molybdene, tungstène, tantale, platine niobium, ter-chrome - nickel-aluminium.

#### 3.3.1 Les résistances en alliage Fe-Ni Cr ou Ni-Cr.

Ces alliages sont élaborés dans les fours électriques à induction ou à arc et subissent des traitements thermiques spéciaux, généralement en four à résistances.

Le tableau de la figure.18., présente à titre exemple, les caractéristiques d'une famille d'alliage Nickel-chrome et Fer-Nickel-Chrome en fonction de la teneur en nickel, en chrome et en fer.

Ces alliages sont parfaitement stables car ils ne sont le siège d'aucune transformation de structure ni à chaud ni à froid. Ils présentent une bonne rigidité une absence de fragilité et une excellente aptitude à la mise en forme. Tous les alliages à base de Nickel-chrome sont austénitiques donc amagnétiques.

##### 3.3.1.1. Formes des éléments chauffants.

### Resistances Metalliques

Ni Cr Fe

Ni Cr 80/20

Fe Cr Al

Metaux Precieux

### Resistances non Metalliques

Carbure de silicium

Graphite

Graphite sous vide

Cermet (ceramique-metal)

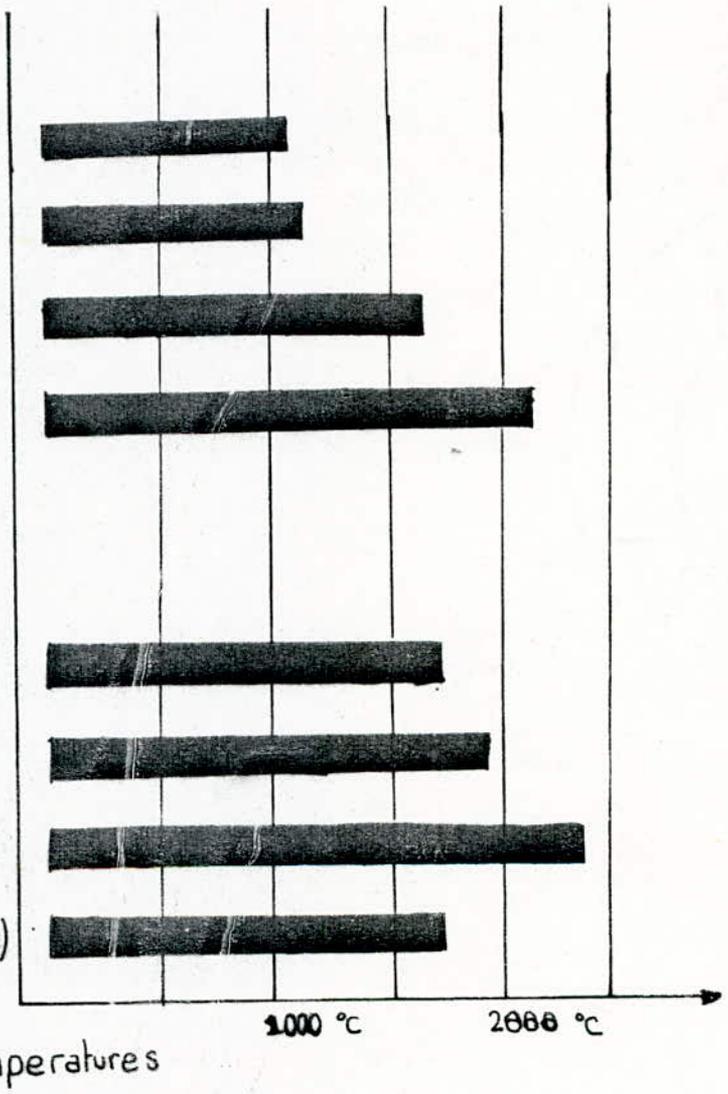


Fig. 17. Temperatures d'emploi de quelques materiaux utilises comme resistance .

Les résistances en ces alliages sont fabriquées à partir de :

- produits de section circulaire : fils ou tiges;
- produits de section elliptique : rubans obtenus par laminage à froid de fils de section circulaire;
- produit de section rectangulaire : bandes fabriquées par cisailage dans des produits plats de plus grande largeur.

On définit une densité surfacique d'un conducteur comme étant, le rapport de la puissance électrique à la surface du conducteur chauffant, exprimée en watts par unité de surface.

Le tableau de la figure.....donne des indications sur la densité surfacique admissible pour différents diamètres de fil et différents température.

### 3.3.1.2. Durée de vie.

Il est évident que la puissance surfacique et la température que l'on choisit pour le conducteur chauffant ont une grande influence sur sa durée. La figure....montre que le logarithme de la durée de vie est inversement proportionnel à la température du conducteur chauffant.

La présence de gaz corrosifs comme l'oxyde sulfureux ( $SO_2$ ), l'hydrogène sulfuré ( $H_2S$ ), l'oxyde sulfurique ( $SO_3$ ), la vapeur d'eau, les vapeurs d'huile la vapeur d'aluminium....peut avoir une influence défavorable sur cette durée de vie.

A partir de la puissance surfacique  $W$  d'un conducteur, on peut déterminer l'intensité du courant nécessaire pour atteindre la température voulue à la surface du conducteur chauffant.

Si  $U$  désigne la circonférence du fil en mm,  $q$  sa section en mm<sup>2</sup> et  $\rho$  sa résistivité en  $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m, on peut alors appliquer l'équation numérique suivante :

.../...

Caracteristiques	Ni 80- Cr 20	Ni 70- Cr 30	Fe Ni 60- Cr 15	Fe Ni 45- Cr 23	Fe Ni 36- Cr 18	Fe Ni 32- Cr 20	Fe Ni 19- Cr 25	Fe Ni 10- Cr 18
Densité	8,35	8,15	8,20	8,00	8,00	7,90	7,90	7,90
Coefficient moyen de dilatation en $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ entre $^{\circ}\text{C}$ et - 500 $^{\circ}\text{C}$ - 1000 $^{\circ}\text{C}$	15,5 17,5	15,0 17,5	15,5 17,5	16,0 17,8	16,0 18,0	16,0 18,0	16,3 18,5	18,0
Chaleur spécifique à 20 $^{\circ}\text{C}$ (Wh/kg $^{\circ}\text{C}$ )	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Resistivité à 20 $^{\circ}\text{C}$ ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	108	118	112,5	112	105	104	95	74
Coefficient moyen de Temperature de La Resistivité ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ).	52	58	120	158	250	250	400	330
Température maximale d'utilisation ( $^{\circ}\text{C}$ )	1200	1250	1100	1150	1050	1050	950	500
Charge maximale usuelle en $\text{w}/\text{cm}^2$ à :								
- 800 $^{\circ}\text{C}$	2,2	2,4	2,0	2,0	1,8	1,8	1,0	
- 900 $^{\circ}\text{C}$	1,7	1,9	1,5	1,5	1,3	1,3	0,5	
- 1000 $^{\circ}\text{C}$	1,3	1,50	1,1	1,1		0,9	0,9	
- 1100 $^{\circ}\text{C}$	0,7	0,85	0,5	0,5				
- 1150 $^{\circ}\text{C}$	0,5	0,65						

Fig. 18 Caracteristiques des resistances Ni - Cr.

$$I^2 = 10 N U Q A^2$$

### 3.4 Formes et dispositions des résistances dans les fours.

Le choix d'un constructeur pour une telle résistance dépend d'un grand nombre de considération d'ordre technique ou économique qui sont parfois contradictoires.

Il faut donc réaliser un compromis entre les diverses exigences en présence.

- Puissance électrique nécessaire;
- volume de la chambre de chauffe;
- volume ou surface disponible pour loger les éléments chauffants,
- nature du courant d'alimentation (continu ou alteroratif : monophaser, triphaser ou diphasé avec obligation ou non d'équilibrer les phases;
- tension d'alimentation
- nature du traitement a effectuer : prolection des éléments chauffants contre les chocs et les gaz, vapeurs ou atmosphères spéciales;
- température : valeur, précision demandée, variation transmission de la chaleur : rayonnement, convection ou conduction);
  
- prix de revient des éléments;
- nature de la régulation.

#### 3.4.1. Résistances pour fours travaillant par rayonnement

Dans les fours travaillant par rayonnement, les éléments chauffant sont le plus souvent employés sous la forme de

- Résistances boudinées;
- Résistances en rubans ondulés

- Résistances en épingles formées en ondes;
- Résistances tubulaires;
- Résistances moulées.

#### 3.4.1.1. Résistances boudinées.

Une résistance boudinée est constituée d'un fil rond façonné sous la forme d'un ressort.

La composition des matériaux servant à la fabrication de support a une influence importante sur la durée de vie des résistances; ces matériaux doivent être exempts d'oxyde de fer et de silice libre.

Dans le façonnage d'une résistance boudinée, il est important de respecter les deux règles suivantes :

- pour assurer une bonne tenue mécanique, le diamètre de boudinage ne doit pas être supérieur à 10 fois le diamètre du fil.
- Pour obtenir un rayonnement libre de la résistance, l'entrave entre deux spires ne doit pas être inférieur à trois fois le diamètre du fil (figure 19)

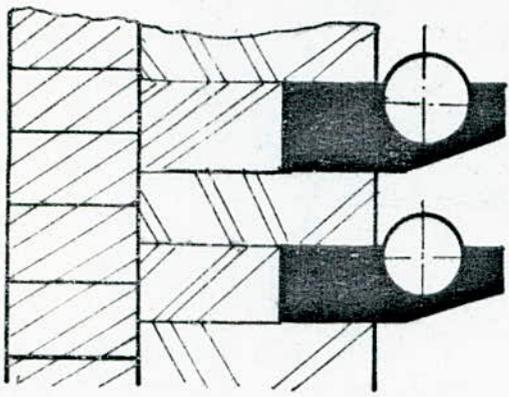
#### 3.5 calcul des résistances.

Les deux relations caractéristiques servant de base calcul des résistances sont celles qui traduisent l'échange thermique entre les éléments chauffants, la charge et les parois d'une part, la puissance dissipée dans la résistance de l'autre.

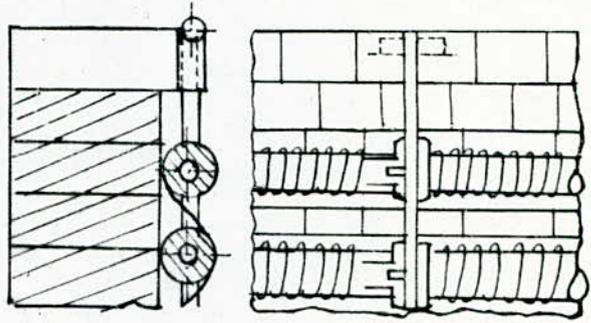
Si les résistances essentiellement par rayonnement le flux thermique échangé entre les éléments chauffants et la charge obéit à la loi de stéfan. Boltzmann décrite dans le paragraphe .....du chapitre

$$P = RC F \sigma (T_R^4 - T_C^4),$$

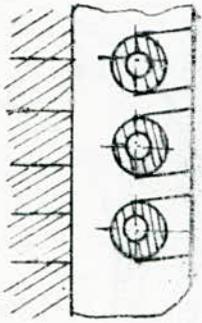
.../...



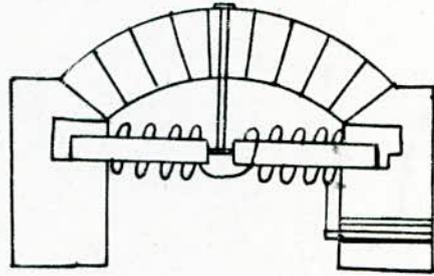
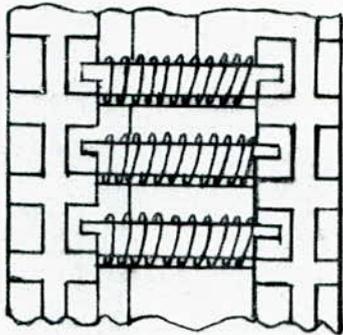
a)



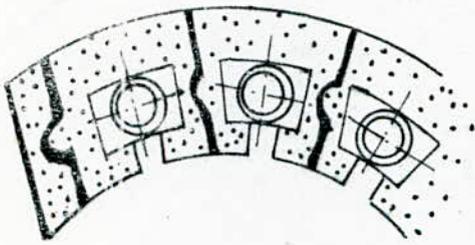
b)



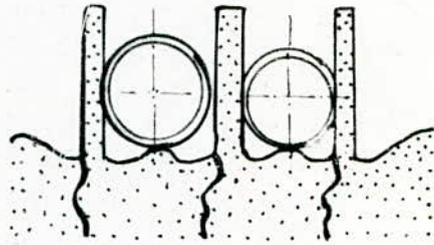
c)



d)



e)



f)

FIG. 19. Resistances boudinées : a) supportées par des briques de forme (en piedroit) ; b) et c) placées sur des supports céramiques (Sillimanite) ; d) suspendues à la voûte ; e) placées en voûte ; f) placées en sole .

D'un point de vue électrique, la relation qui doit être mise en regard de cette définissant le flux thermique est la loi de joule exprimée sous la forme.

$$P_w = \frac{J^2}{R}$$

$P_w$  en watts;  
 $J$  en volts;  
 $R$  en ohms mètres.

L'élément caractéristique utilisé pour le calcul de la résistance est la température  $T_{RM}$  qu'elle ne doit pas dépasser; connaissant  $R$  C F, il est en effet possible de calculer le flux thermique superficiel admissible et les dimensions du corps de chauffe puisque, à l'équilibre, toute la puissance électrique dissipée doit se trouver dans le flux thermique émis par la résistance.

$$S \cdot J^2 = \frac{P_w}{R}$$

3.4

$S$ , surface rayonnante externe de l'élément chauffant.

Pour déterminer les dimensions qu'il faut donner au corps de chauffe, on peut, soit procéder par le calcul, soit se servir de diagrammes ou d'abaques fournis par les fabricants de conducteurs chauffants.

Dans le procédé de calcul, le diamètre  $d$  de fils ronds est déterminé de la façon suivante.

$$d = 0,343 \sqrt[3]{\frac{E}{n} \frac{P}{J}}$$

3.5

$E$ , résistivité en  $\text{mm}^2 / \text{m}$ ;

$n$ , en  $\text{w/cm}^2$ ,

$P$ , en  $\text{w}$  ;

$J$ , en  $\text{v}$ .

$d$ , en  $\text{mm}$

.../...

La longueur  $l$  du fil est alors obtenue à partir de la surface totale du conducteur chauffant :

$$\pi \cdot d \cdot l = \frac{P}{\sigma}$$

3.6

### 3.5.1. Remarque sur les transferts de chaleur entre résistances et charge

Dans les fours avec ou sans brassage d'atmosphère, les échanges thermiques se font par convection et rayonnement au delà de 750 °C le rayonnement devient prépondérant.

Accroître les performances des fours à résistances, c'est donc essentiellement augmenter le transfert d'énergie par rayonnement en améliorant les conditions de ce transfert .

Le Flux thermique échangé entre les résistances et la charge obéit à la loi de STEFAN-BOLTZMANN pour améliorer l'échange par rayonnement, il faut donc agir sur les trois paramètres suivants :

- Température maximale des résistances ;
- Facteur de forme global du four
- émissivité des résistances

De ces trois facteurs, la température maximale des résistances est de loin le plus important. Toutefois, un choix judicieux de la forme du four, de la nature des résistances et de leur répartition sur ses parois apporte également une contribution non négligeable à l'amélioration des performances de fours à résistances.

### 3.6. Four à Résistances et Régulation

Les fours à résistances permettent d'obtenir une grande précision de température. L'uniformité de température dépend de la répartition et de la nature des corps de chauffe, du brassage de l'atmosphère et de la régulation. Les fours électrique comportent généralement deux types de réglages, celui de la puissance électrique et celui de la température (température de la charge et des résistances).

#### 3.6.1. Constitution d'un système de régulation pour fours à résistances

Un système de régulation comprend essentiellement :

- un ou plusieurs détecteurs de température qui mesurent la température du four (ou des résistances) et la transforment en une grandeur électrique équivalente. Ce dispositif est généralement constitué d'un pyromètre un capteur de température à thermocouple et d'un galvanomètre permet l'affichage puisque la force électromotrice, qui se manifeste donc l'intensité du courant est une fonction de la différence de température entre la soudeuse chaude et froide (voir figure)

- Un dispositif de comparaison entre la température mesurée et la température de consigne (voir figure)

La grandeur électrique mesurée par le pyromètre est comparée à une grandeur de référence, ce qui donne un signal d'écart  $\mathcal{E}$ . Sa valeur est nulle lorsque le four ou les résistances sont à la température désirée, positive si on s'écarte de la valeur de référence.

- Un système de commande et de variation de la puissance.

Le signal d'écart est appliqué à l'organe correcteur qui règle l'énergie électrique absorbée par le four. La commande de l'alimentation électrique des résistances fait appel à des contacteurs statiques (thyristors).

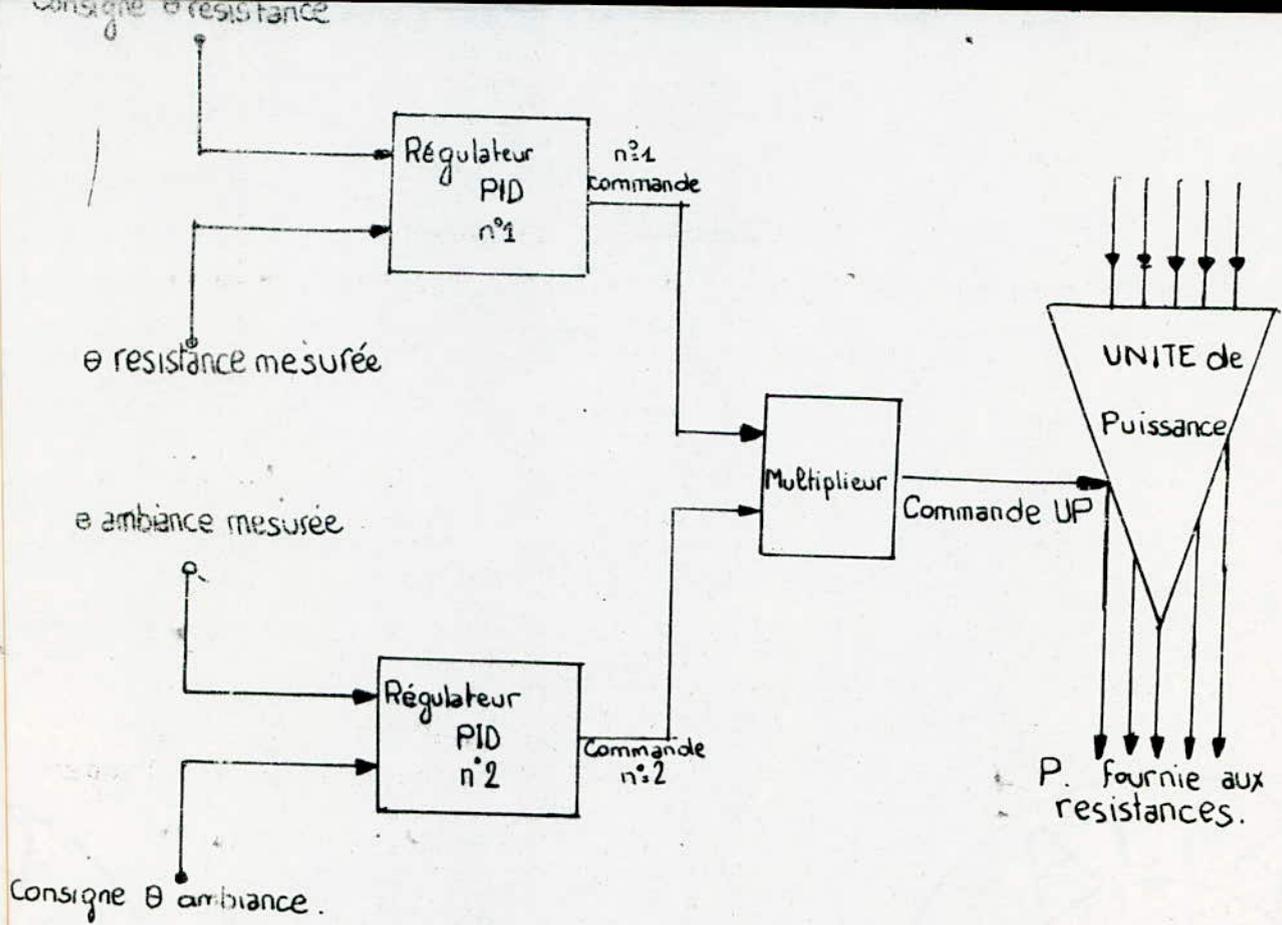


Fig. 20. Schéma de principe d'une alimentation à thyristors commandée par deux régulateurs PID (un pour la charge, l'autre pour les résistances).

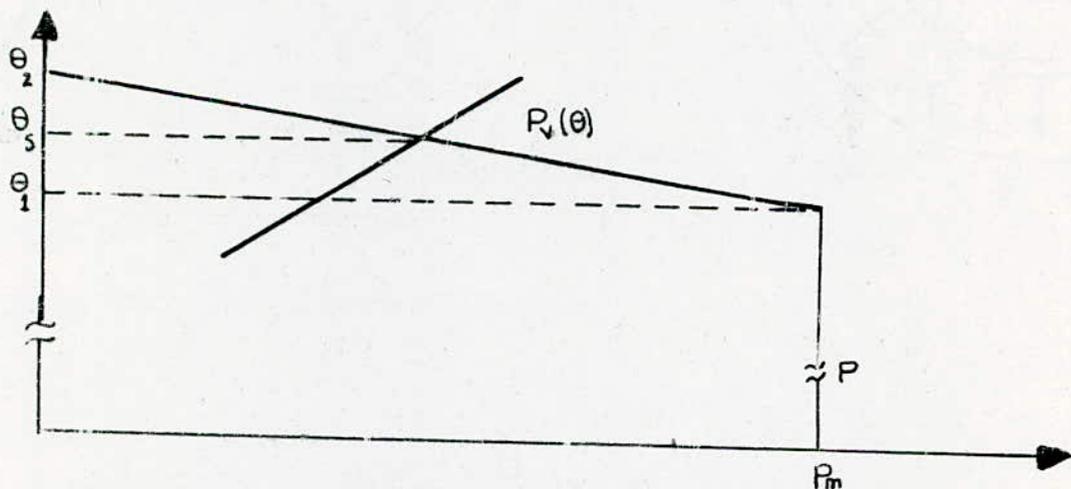


Fig. 21 Régulation proportionnelle  $\theta_2 - \theta_1$  : bande de proportionnalité ;  $P_m$  puissance maximale.

### 3.6.2. Régulation à Thyristors (5)

Les thyristors sont des ~~semi~~-conducteurs composés de quatre couches p.n.p.n composé d'une cathode, anode et une gachette fig. 20.)

Ils peuvent assurer la commande et le réglage du courant débité par une source dans un récepteur. Ils permettent d'assurer la liaison constante entre la source et la charge puis de l'interrompre, c'est la marche en interrupteur.

Ils permettent aussi de rendre intermittente cette liaison, et, par là, de régler l'intensité du courant que la source débite dans le récepteur ; c'est le fonctionnement en gradateur.

L'élément de base est formé de deux thyristors Th et Th' montés en connexions croisées (en tête-bêche) et placé entre la source et la charge figure ...20

### 3.6.3. Modes de commande par thyristors

Il existe deux principaux types de commande par thyristors

La commande par trains d'onde.

La commande se fait par paquet d'alternances entières. Les Thyristors ne son déclenchés qu'au passage à zéro de la tension alternative alimentant la charge.

En fonction du signal d'écart traduisant la différence entre le température de la charge et la température de consigne, le système de commande des Thyristors ne laisse passer dans la charge pendant une base de  $K\text{mps}$   $T$  (correspondant à un nombre entier d'alternance) qu'un nombre entier d'alternance inférieur ou égal à celui caractérisant la base de temps.  $T$  est généralement de quelques secondes. La variation de puissance est linéaire avec la tension de commande et l'allumage des Thyristors lors du passage à zéro de la tension.

En revanche le circuit de commande est plus complexe que pour la commande par angle de phase.

#### - Commande par angle de phase

Dans ce système le signal d'écart provoque, pour chaque alternance, l'allumage du Thyristor avec un certain retard par rapport au passage à zéro de la tension .

En fonction de ce passage, la puissance efficace sur une alternance est donc plus ou moins importante. Ce mode de commande qui permet de découper les alternances, peut conduire à une grande précision puisque son temps de réponse est extrêmement court.

En revanche ce système engendre des parasites (création d'harmonique).

### 3.6.4. Commande par Thyristors et fours à résistances.

La commande à Thyristors permet, en particulier, de réaliser facilement des régulations P. I. D.....(Proportionnelles, Intégrales, Différentielles), c'est-à-dire des régulations continues :

- Proportionnelles, car au voisinage de la température de consigne  $\theta_2$  (dans la bande de proportionnalisation), la puissance absorbée croit proportionnellement à l'écart entre l'entrée de la température  $\theta_2$  et la température de la charge ( voir fig 21), la charge n'atteint donc jamais la température de consigne, bien que s'en rapprochant fortement et la température vers laquelle tend le four est température du régime Os déterminé par le point de rencontre de la courbe de la puissance de chauffe avec la courbe représentant les pertes du four (figure 21)

- Intégrales, car avec des régulations purement proportionnelles, l'écart permanent de température, entre charge et consigne peut devenir trop important si, pour des questions de stabilité, la bande de proportionnalité ne peut être trop étroite ; l'action intégrale sert à compenser cet écart de température .

Cette action est ainsi nommée parce que l'action sur l'organe correcteur est également fonction de l'intégrale  $\int \epsilon dt$  de l'écart de température  $t$  désignant le temps ;

- différentielles, car avec des régulations purement proportionnelles il peut se produire des oscillations si la bande de proportionnalité est à l'inverse du cas précédent, trop étroite ; l'action différentielle sert à limiter ces oscillations.

Cette action est ainsi nommée parce que l'action sur l'organe correcteur est également fonction de la dérivée  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  de  $\varepsilon$  par rapport au temps.

### 3.7 Evolution des fours A RESISTANCES

Les fours à résistances continuent à connaître de nombreuses améliorations : introduction de nouveaux alliages pour la fabrication des résistances, amélioration des alliages existants, mécanisation poussée, régulation plus fines... Trois types d'évolution paraissent toutefois particulièrement importants.

- Le développement des fours à résistances à haute densité de puissance et à haute température ;
- Le développement de fours à faible inertie thermique ;
- Le développement des fours sous vide.

CAPITRE IV

ETUDE & REALISATION

UN FOUR DE FUSION  
BASCULANT ISOLE AVEC UN  
REGULATEUR ELECTRONIQUE

.....

R E S U M E

Le four que j'ai conçu, est un four de fusion basculant, mobile, et isolé thermiquement, la température est régulée par un régulateur électronique PID.

Tous les éléments nécessaires à la réalisation de ce projet ont été récupérés à travers les ferrailles de notre école (ENP), et celle de L'université de BAB-EZZOUAR (USIHB).

Certains éléments ont été ramené du complexe de Rouiba (béton réfractaire, briques isolantes, fibre céramique).

Je tiens à remercier énormément mon promoteur Mr.KARPATI qui n'a ménagé aucun effort pour mener à bien ce projet, Mr.SEBIA du C.E.N. qui m'a aidé dans la partie électronique.

Le travail que j'ai réalisé se répartit en trois parties :

- Partie thermique
- Partie mécanique
- Partie électrique et électronique.

Chaque fois qu'il s'agit d'établir un projet d'installation de chauffage par résistance, il faut commencer par calculer les quantités de chaleur nécessaires pour l'opération envisagée et déterminer la puissance correspondante.

.../...

Ce n'est qu'après qu'on procède au dimensionnement des parois du four et des conducteurs chauffants (1)

Les fours de fusion à creuset

Le métal est fondu dans un creuset placé dans une enceinte tapissée de résistances.

Les creusets métallique (en acier ou en fonte) sont robustes d'un coût peu élevé et possèdent une bonne conductivité thermique, mais réagissent souvent avec les métaux fondus qu'ils contiennent.

Les creusets en graphite ou en carbure de silicium évitent l'altération du métal fondu, mais leur durée de vie est assez faible (1).

Les creusets les plus couramment utilisés sont :

- en graphite pour les alliages d'aluminium,
- en graphite ou en carbure de silicium pour les alliages cuivreux,
- en acier pour les alliages de magnésium,
- en fonte pour les alliages de zinc (zanak).

En fonction des besoins, les fours à creuset à résistance sont fixes ou basculant.

Certains fours permettent d'effectuer des fusions sous ou sous atmosphères spéciales (ainsi les surfaces des bains d'alliages de magnésium, métal très oxydable, est-elle souvent protégée par une atmosphère d'hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub>).

1 - Calcul de la puissance à installer

$$W = \frac{C_1 + C_2 + AD}{T} \quad (\text{voir relation})$$

1-1 Energie absorbée par la charge

Le calcul suivant est basé sur l'aluminium et ses alliages.

$$C_1 = \int_{T_a}^{T_f} n c_p(S) dT + n L_f + \int_{T_f}^{T_{max}} n c_p(L) dT$$

$C_1$ , énergie absorbée par la charge en KJ,

$T_a$ , température ambiante en °K,

$T_f$ , température de fusion °K,

$n$ , nombre de mole du métal à fondre en mole,

$C_p(S)$ , chaleur spécifique molaire en Cal/deg-mole,  
du métal solide,

$C_p(L)$ , chaleur spécifique molaire en Cal/deg-mole du  
métal liquide,

$L_f$ , chaleur latente en Cal/mole,

$T_{max}$ , température maximale de la charge en °K,

1-1-1- Calcul du volume du creuset

Le creuset du four est en graphite (voir figure.23.)

$$V = M \frac{d^2}{4} H'$$

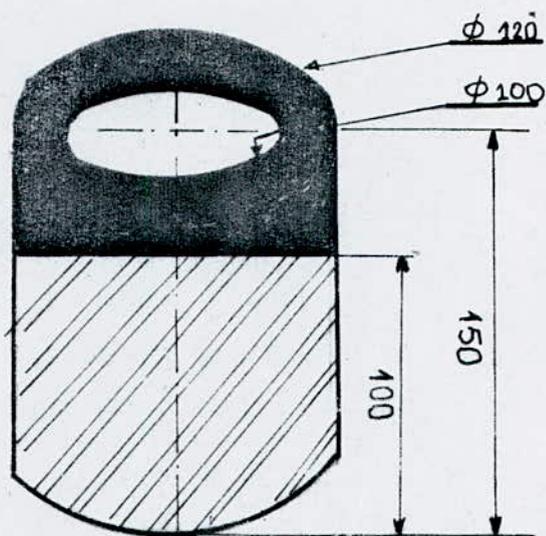


Fig. 23. Creuset en graphite

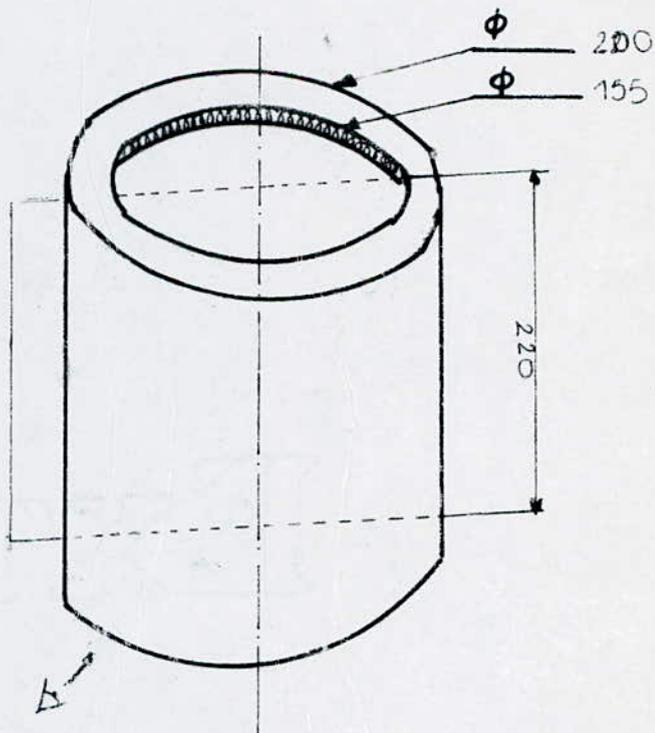
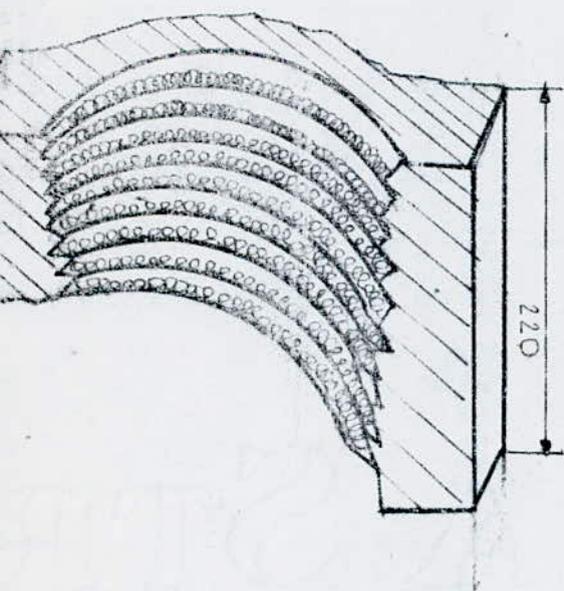


Fig. 24. Schema du cylindre en beton refractaire

$$d = 100 \text{ mm}$$

$$h' = \frac{h}{3} \text{ (par mesure de sécurité)}$$

$$h = 480 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{d'où } V &= 78,5 \cdot 10^4 \text{ mm}^3 \\ \text{ou } V &= 78,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

1-1-2- Masse de Al à fondre

$$\begin{aligned} m_{\text{al}} &= \rho_{\text{al}} \cdot V \\ &= 2700 \cdot 78,5 \cdot 10^{-5} \\ m_{\text{al}} &= 2,22 \text{ kgs} \end{aligned}$$

Le nombre de mole sera

$$M_{\text{al}} = 70 \text{ moles}$$

L'énergie absorbée par la masse de Al fondue est :

$$L_f = 1000 \text{ cal/mole,}$$

$$T_f = 933 \text{ }^\circ\text{K,}$$

$$T_a = 190 \text{ }^\circ\text{K,}$$

$$C_p (s) = 1,94 + 2,96 \cdot 10^{-3} T,$$

$$C_p (L) = 7,$$

$$T_{\text{max}} = 1073 \text{ }^\circ\text{K,}$$

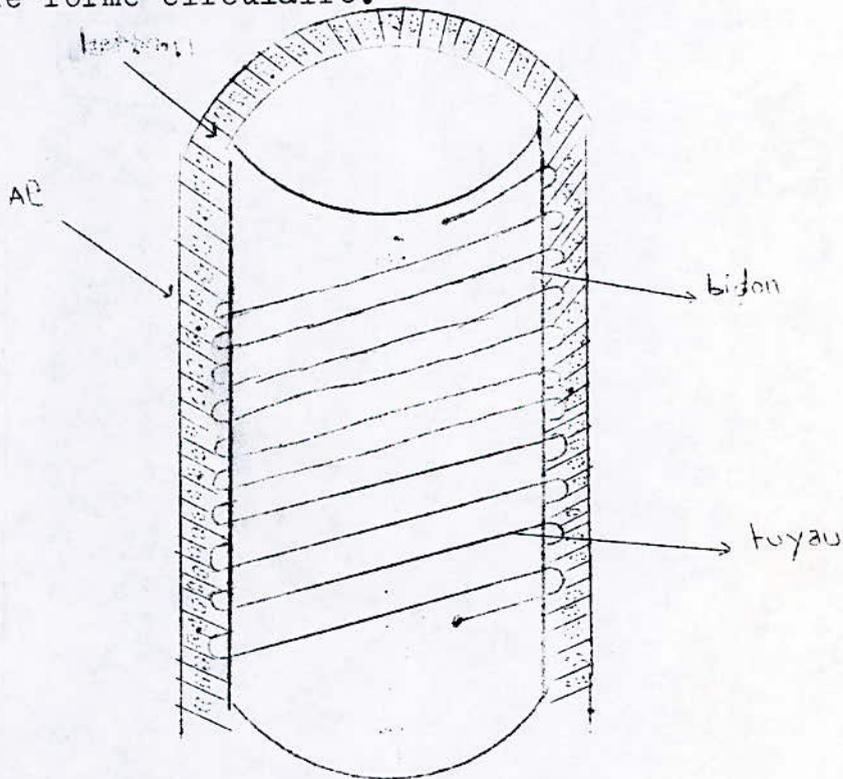
$$M = 70 \text{ moles,}$$

$$\underline{C_1 = 0,700 \text{ KWH}}$$

1.1.2 Comment fabriquer un moule pour la cage de resistance?

Les elements necessaires sont,

- un bidon d' huile de 5 litres;
- ciment refractaire (phlox 160 95% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> T<sub>MAX</sub> = 1900 °C )
- un tuyau de longueur et diametre egales à ceux de la resistance boudinnées;
- une plaque d' aluminium ou autre;
- une en bois de forme circulaire.



Suite.....

## 12 CALCUL DES DEPERDITIONS THERMIQUES

On suppose que les parois sont planes  
calcul du flux de chaleur  $\Phi$  :

D'après la formule 3.4 La densité de flux de chaleur est calculée par :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\sum \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i}} \quad [W/m^2]$$

d'après la figure

$$\varphi = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4} + \frac{e_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$T_i = 800^\circ C$$

$$T_e = 25^\circ C$$

$$e_1 = 20 \text{ mm}$$

$$e_2 = 30 \text{ "}$$

$$e_3 = 100 \text{ "}$$

$$e_4 = 50 \text{ "}$$

$$e_5 = 1,5 \text{ "}$$

$$\lambda_1 = 1,57 \text{ W/m}^\circ C$$

$$\lambda_2 = 0,062 \text{ "}$$

$$\lambda_3 = 0,211 \text{ "}$$

$$\lambda_4 = 0,043 \text{ "}$$

$$\lambda_5 = 45,9 \text{ "}$$

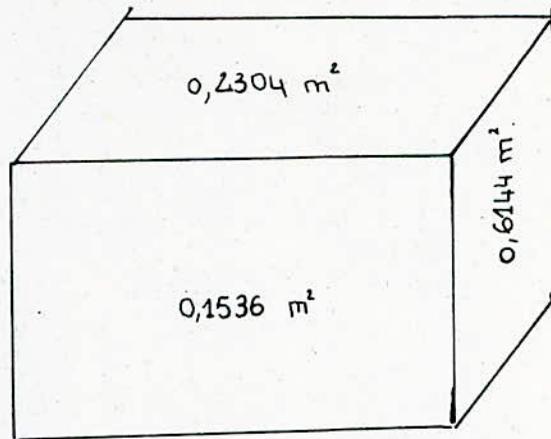
$$\alpha_2 = ?$$

$$\alpha_1 = 100 \text{ W/m}^\circ C \quad \text{à } T = 800^\circ C :$$

$$\alpha_2 = 10 \text{ W/m}^\circ C \quad \text{pour un air calme}$$

Calcul du coefficient de convection  $\alpha_2$

$$\varphi = 344,54 \quad W/m^2$$



$$S_{\text{four}} = 1,075 \text{ m}^2$$

calcul du flux  $\Phi$

$$\Phi = \varphi \cdot S_{\text{four}}$$

$$= 374,54 \cdot 1,075$$

$$\Phi = 370,5 \text{ W.}$$

L'énergie perdue pendant 1 heure à travers les parois du four sera :

$$Q_p = \Phi \cdot t$$

$$= 370,5 \cdot 1 \text{ heure}$$

$$\boxed{Q_p = 370,5 \text{ KJ.}}$$

1.2.1 Détermination des températures  $T_i$  dans chaque couche  $i$ .

(voir figure 25.)

$$T_1 = T_i - \left( \frac{\varphi}{\alpha_1} + \frac{\varphi e_1}{\lambda_2} \right) \quad \text{d'où} \quad T_1 = 800 - \left( \frac{344,54}{100} + \frac{344,54 \cdot 0,02}{1,51} \right) = 792,42^\circ \text{C}$$

$$T_2 = T_1 - \varphi \frac{e_2}{\lambda_2} \quad \text{"} \quad T_2 = 792,42 - 344,54 \frac{0,03}{0,062} = 625,72$$

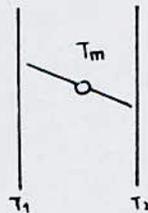
$$T_3 = T_2 - \varphi \frac{e_3}{\lambda_3} \quad \text{"} \quad T_3 = 462,449^\circ \text{C}$$

$$T_4 = T_3 - \varphi \frac{e_4}{\lambda_4} \quad \text{"} \quad T_4 = 62,08^\circ \text{C}$$

$$T_5 = T_4 + \varphi \left( \frac{1}{\alpha_2} + \frac{e_5}{\lambda_5} \right) \quad \text{"} \quad T_5 = 25,55^\circ \text{C}$$

La température moyenne d'une couche est calculée comme suit:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$



1.3 Calcul de la chaleur accumulée dans le four

$$Q_{\text{charge}} = m_{\text{pe}} \cdot c_{p_{\text{pe}}} \Delta T = 2,2 \cdot 1,089 \cdot (800 - 25) = 1857 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{cleuset}} = m_{\text{cr}} \cdot c_{p_{\text{cr}}} \Delta T = 0,75 \cdot 1,256 \cdot (800 - 25) = 730 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{cylindre}} = m_{\text{cyl}} \cdot c_{p_{\text{cyl}}} (T_{m_1} - T_e) = 4,7 \cdot 1,172 \cdot (796,2 - 25) = 4258 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{fc} = m \cdot c_p (T_{m2} - T_e) = 0,4 \cdot 0,63 (709,07 - 25) = 202,55 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{roque}} = m \cdot c_p (T_{m3} - T_e) = 9,4 \cdot 0,975 (544,08 - 25) = 4757,36 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{p.v} = m \cdot c_p (T_{m4} - T_e) = 1,2 \cdot 0,67 (262,2 - 25) = 185,11 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{acier}} = m \cdot c_p (T_{m5} - T_e) = 2,1 \cdot 0,45 (43,81 - 25) = 17,77 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{acc totale}} = 12\,008,46 \text{ [kJ]}$$

La puissance à installer sera.

$$\frac{P}{t} = (Q_{\text{acc}} + Q_{\text{perte}}) / t$$

où  $t$  désigne le temps du chauffage pour atteindre  $800^\circ\text{C}$  dans la charge.

$$Q_{\text{acc}} = 12\,008,46 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{perte}} = 370,5 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{tot}} = 12\,378,91 \text{ [kJ]}$$

afin de ne pas solliciter trop la résistance afin d'augmenter sa durée de vie, la durée de chauffage est fixée à 1 heure.

d'où

$$P_{\text{inst}} = \frac{Q_{\text{tot}}}{t}$$

$$P_{\text{inst}} = 3,3 \cdot 10^3 \text{ W.}$$

Les étapes à suivre sont les suivantes :

- 1/- Faites trouver le bidon en haut d'un diamètre inférieur à celui du tuyau;
- 2/- Introduisez un bout du tuyau et enroulez ce dernier autour du bidon tout en respectant un pas constant;
- 3/- Fixez l'extrémité restante dans la partie inférieure du bidon.
- 4/- Introduisez le bidon déjà prêt dans un cylindre en AL (centrez la plaque d'AL avec un centrage mécanique).
- 5/- Faites reposer le système sur la plaquette circulaire.

### 1.1.3 Préparation du béton

Faites travailler le ciment avec un peu d'eau, jusqu'à l'obtention d'une pâte, mettez là à l'intérieur du moule, pour assurer un bon compactage du réfractaire on utilise le Vibreur Tam.

### 1.1.4 Dimensionnement du corps de chauffe

Le corps de chauffe est constitué d'un alliage Ni-Cr 80/20 boudiné.

Le flux de chaleur entre la résistance et la charge est calculé par la formule de STEFAN-BOLTZMANN.

$$\Phi = \epsilon \sigma F S (T_R^4 - T_C^4)$$

- 63 -

$$R = \frac{U^2}{P}$$

$$U = 220 \text{ V}$$

$$P = 3300 \text{ W}$$

$$R = 14 \Omega$$

Calcul de la longueur du corps de chauffe

$$L = \frac{R \cdot S}{\rho}$$

Diametre du fil:  $d = 2 \text{ mm}$

$$\rho = 100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \quad \text{à } 1000^\circ\text{C}$$

$$l = 43 \text{ m}$$

la resistance que j'ai recupere et de caracteristiques suivantes:

$$R = 10 \Omega$$

$$l = 50 \text{ m en spires}$$

$$= 10 \text{ m en fil}$$

$$S' = \pi d l = 628 \text{ cm}^2$$

$$n = 5,3 \text{ W/cm}^2$$

Cette partie est exécutée au département mécanique.  
C'est la partie la plus longue, vu le manque de moyens et les difficultés rencontrées pour l'octroi du matériel nécessaire.

La majorité des équipements ont été récupérés à partir des ferrailles.

Cette partie se résume dans les points suivants:

- 1/ Réalisation de la carcasse du four;
- 2/ Réalisation du système de basculement;
- 3/ Réalisation de la cage du régulateur;
- 4/ Réalisation de l'enveloppe extérieure du four en aluminium.

1 - réalisation de la carcasse du four

les éléments nécessaires sont:

- 1 - plaque en acier 1mm ;
- 2 - cornière
- 3 - des vis parker 3X6 mm

les cornières servent à fabriquer un cadre pour donner plus de rigidité au four (voir figure 25)

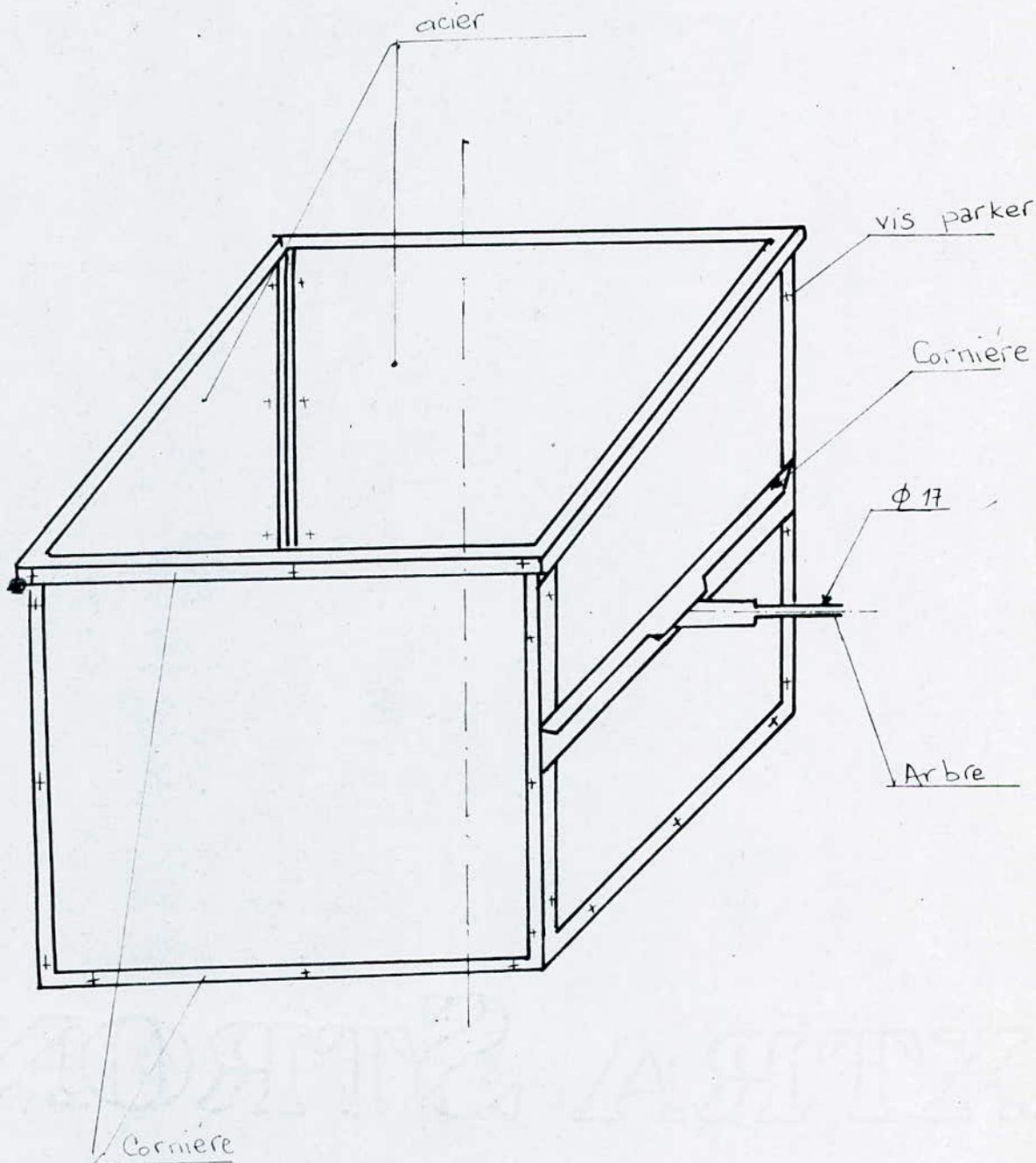


Fig.25. Carcasse métallique du four.

## 2 -realisation du systeme de basculement

Le systeme de basculement est simple,il est realise à partir des elements suivants:

- 1-deux roulements,de type"butée à bille";
  - 2-deux cages de roulement usinées au tour;
  - 3-deux arbres usinés au tour;
  - 4-deux cornières 40 x 30 x 33 mm soudées à la carcasse du four(voir figure )
  - 5- un levier pour le basculement.
- (tous ces elements ont recupérés )

## 3- realisation de la cage du regulateur

Cette est realisée à partir d'une plaque en zinc,ses dimensions sont indiquées dans la figure .

POUR ne pas negliger le cote esthetique,j'ai enveloppé le four d'une enveloppe en aluminium.

## PARTIE ELECTRIQUE

LE CIRCUIT electrique est donne dans la figure  
les constituants de ce circuit sont :

- 1/ un contacteur electromecanique de puissance;
- 2/ DE CABLE de grosse section pour la partie de puissance (thyristers);
- 3/ DE CABLE DE FAIBLE section (circuit de commande)

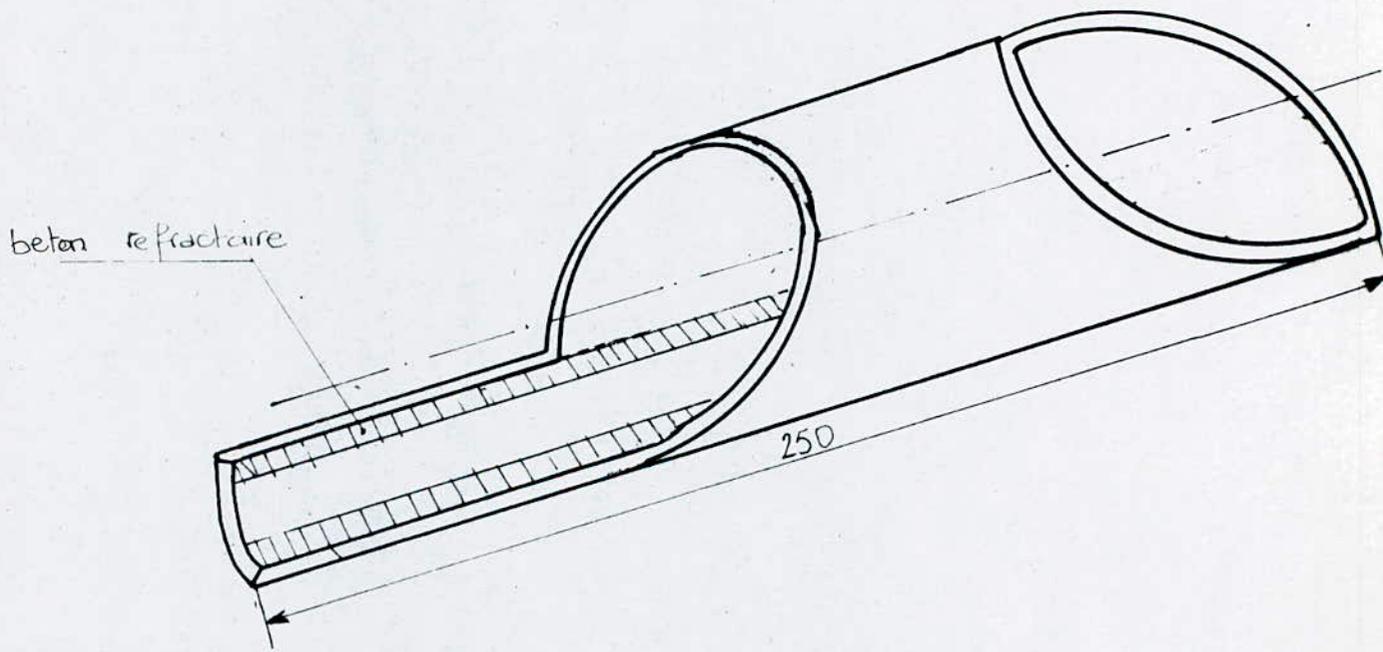
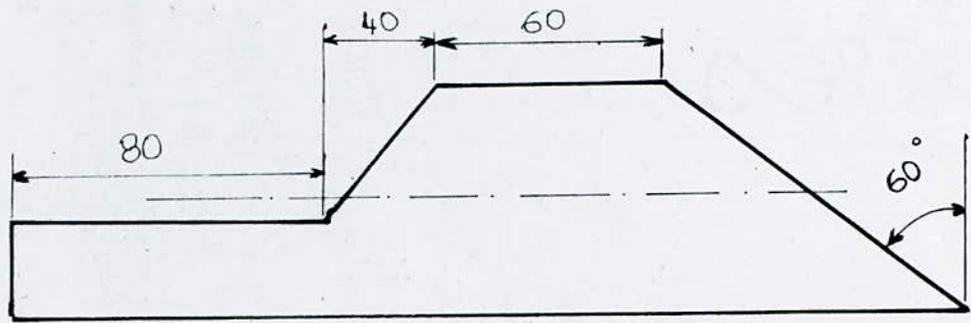


FIG. 26. bec et Canal de coulée.

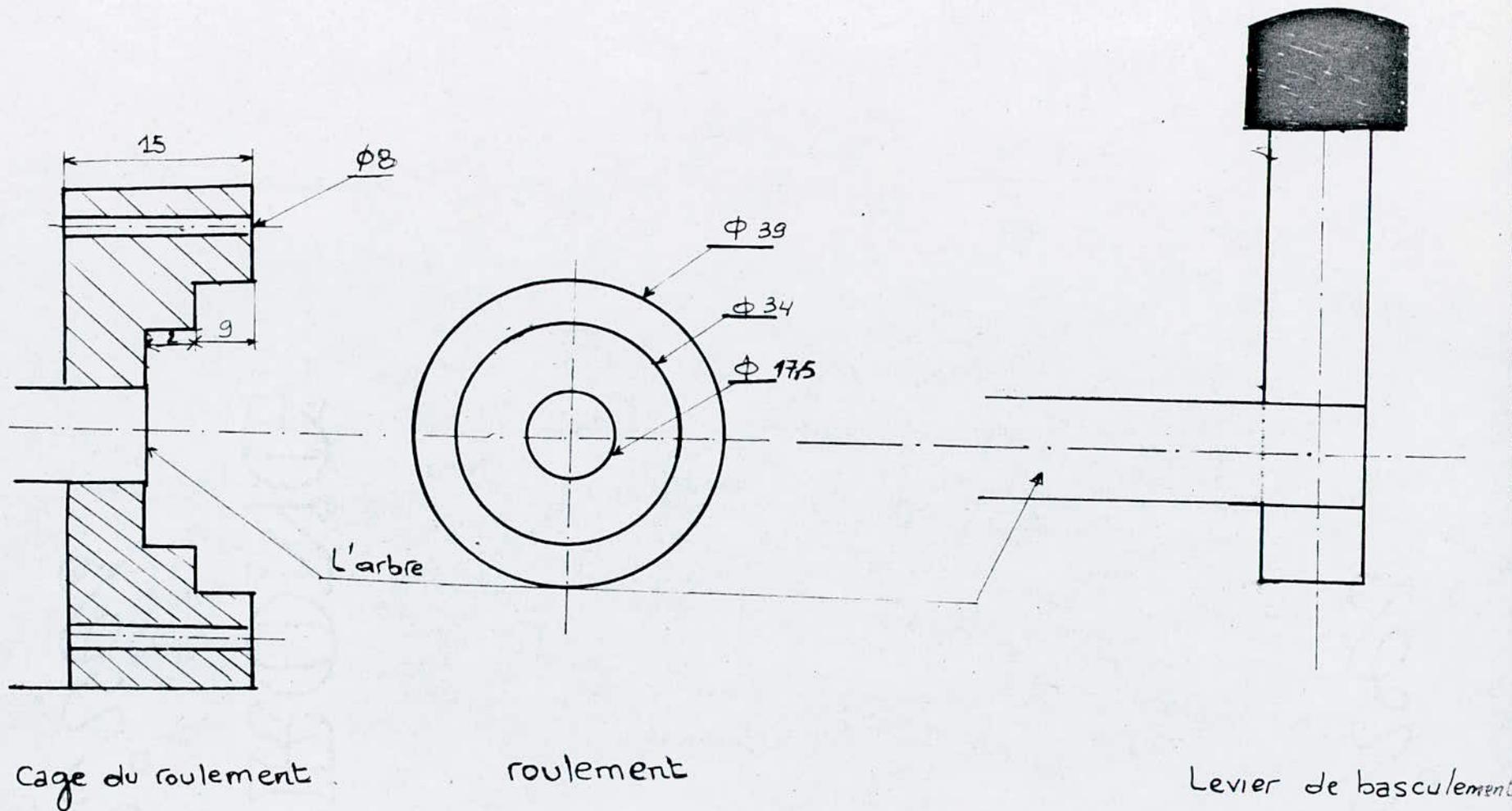
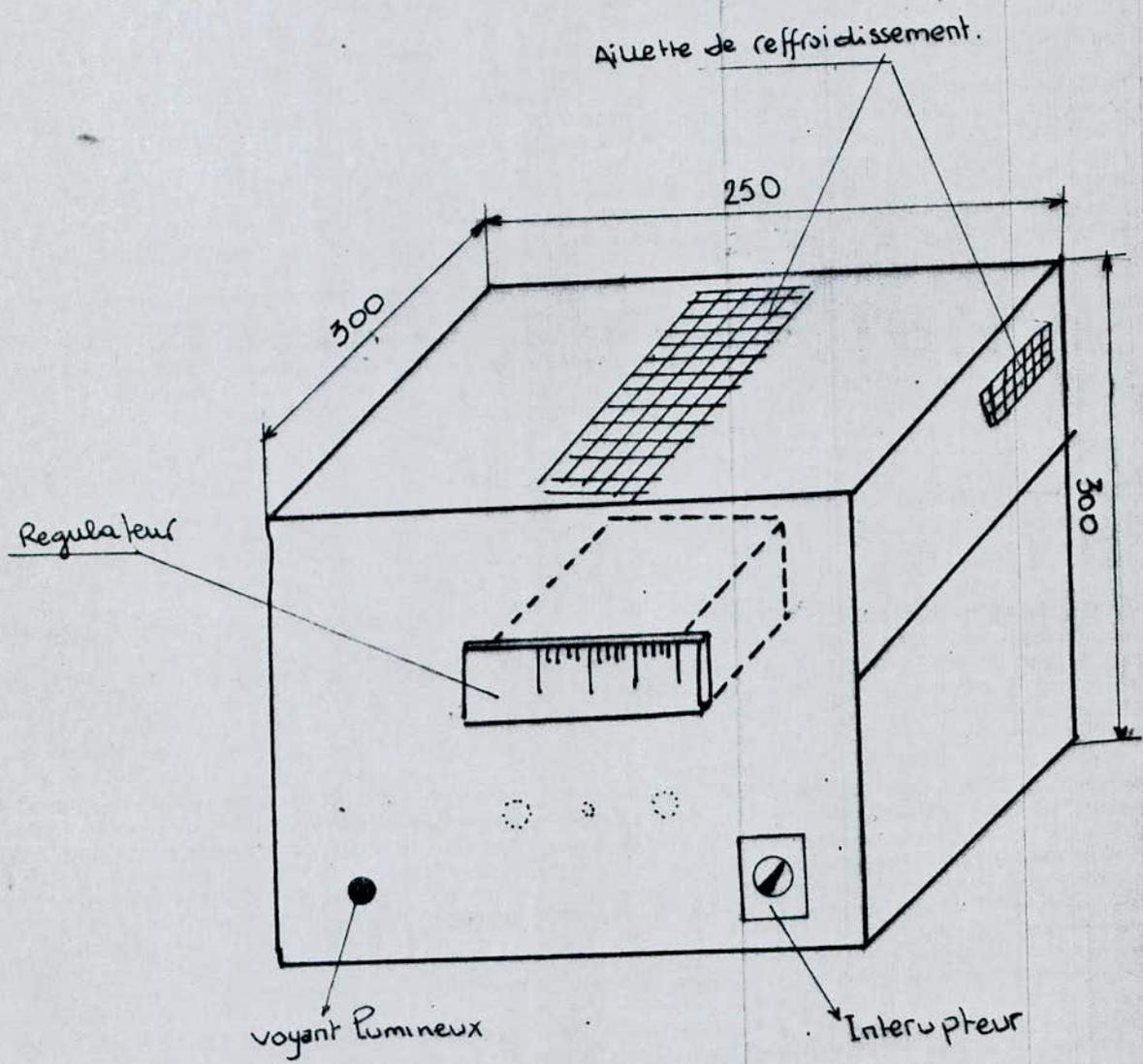


Fig. 27 Systeme de basculement



Carcasse du système de régulation

- 4/ D'un interrupteur;
- 5/ de 2 fusibles l'un de 25A-250V POUR la partie de puissance, et de 6A - 250 V Pour la partie de commande
- 6/ D'un systeme de filtration et de redressement du courant delivré par les thyristors.

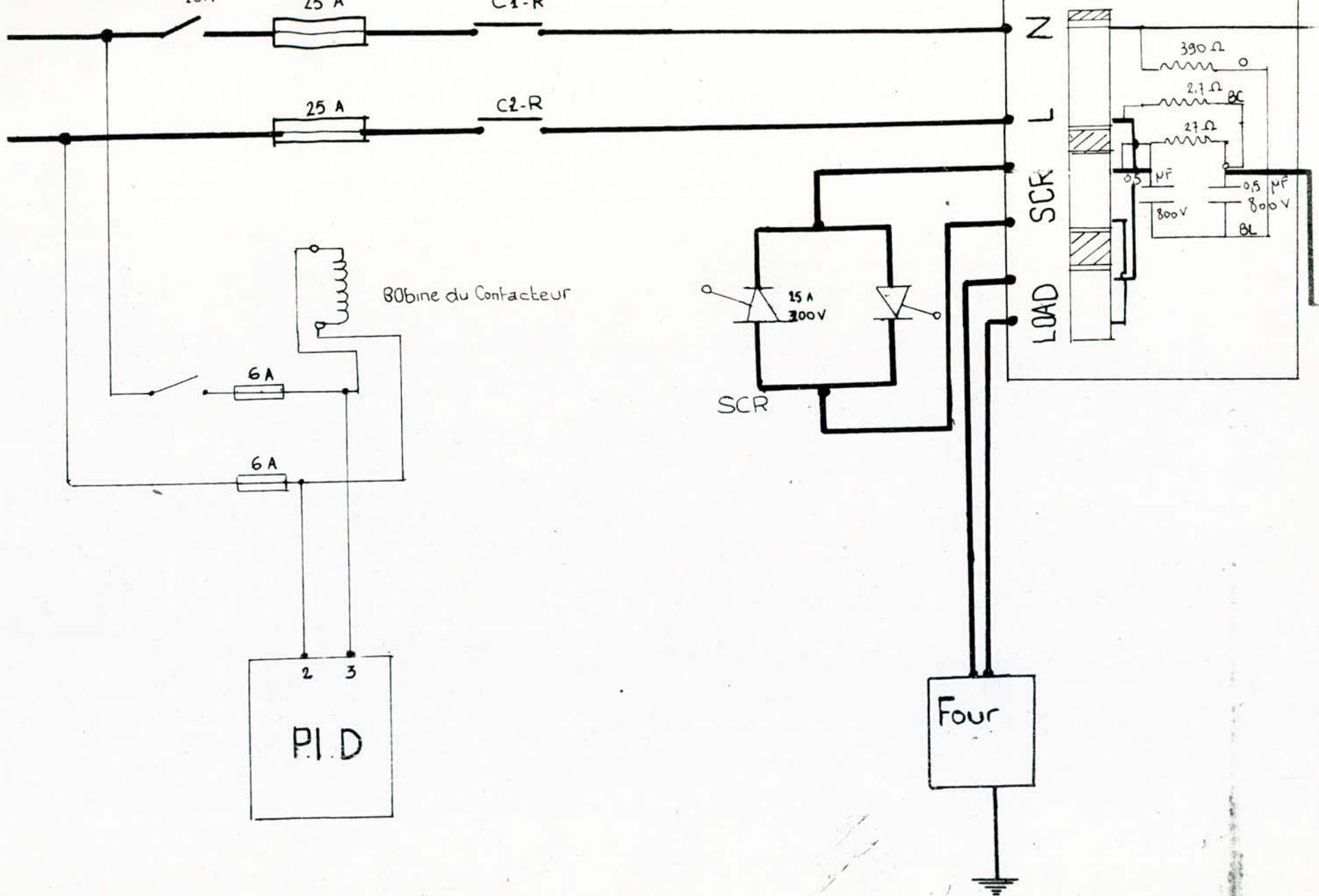
Tous ces elements ont ete recuperés.

Le regulateur que j'utilise est de type P.I.D.

$$I = 0,25 \text{ A}$$

$$U = 220 \text{ V}$$

Le schéma synoptique du systeme de regulation est donne dans la figure



CIRCUIT ELECTRIQUE DU FOUR

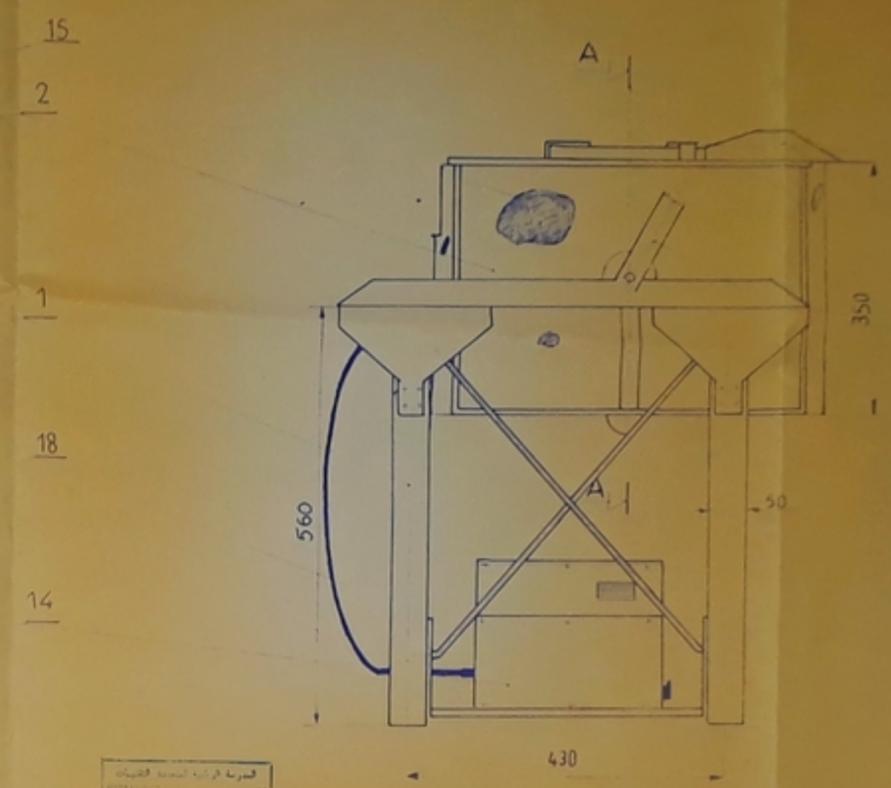
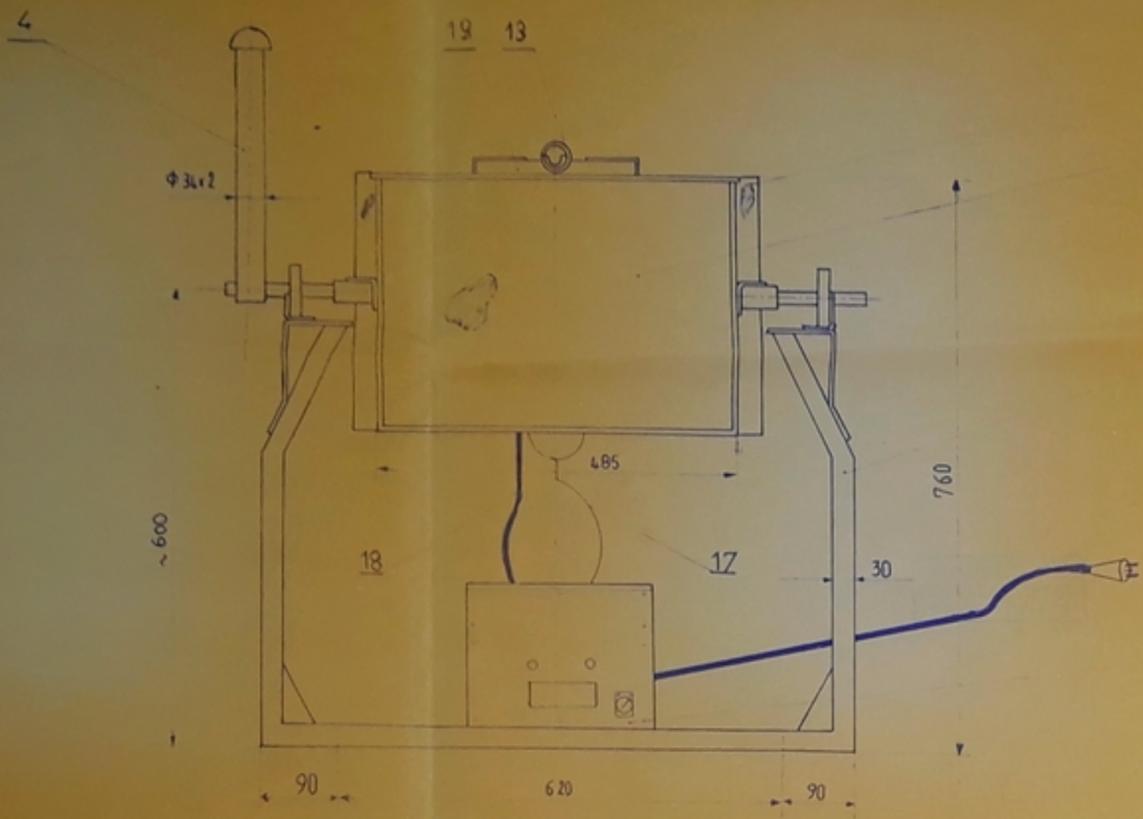
## CONCLUSION

Ce travail que je vous ai présenté revêt une grande importance vu la conjoncture économique actuelle étant donné que la majorité des éléments nécessaires à la réalisations sont récupérés à travers les ferrailles . Je suggère dorénavant dans le cadre de projet de fin d'études de faire associer deux ou trois étudiants de départements différents sur un projet de réalisation , par exemple :

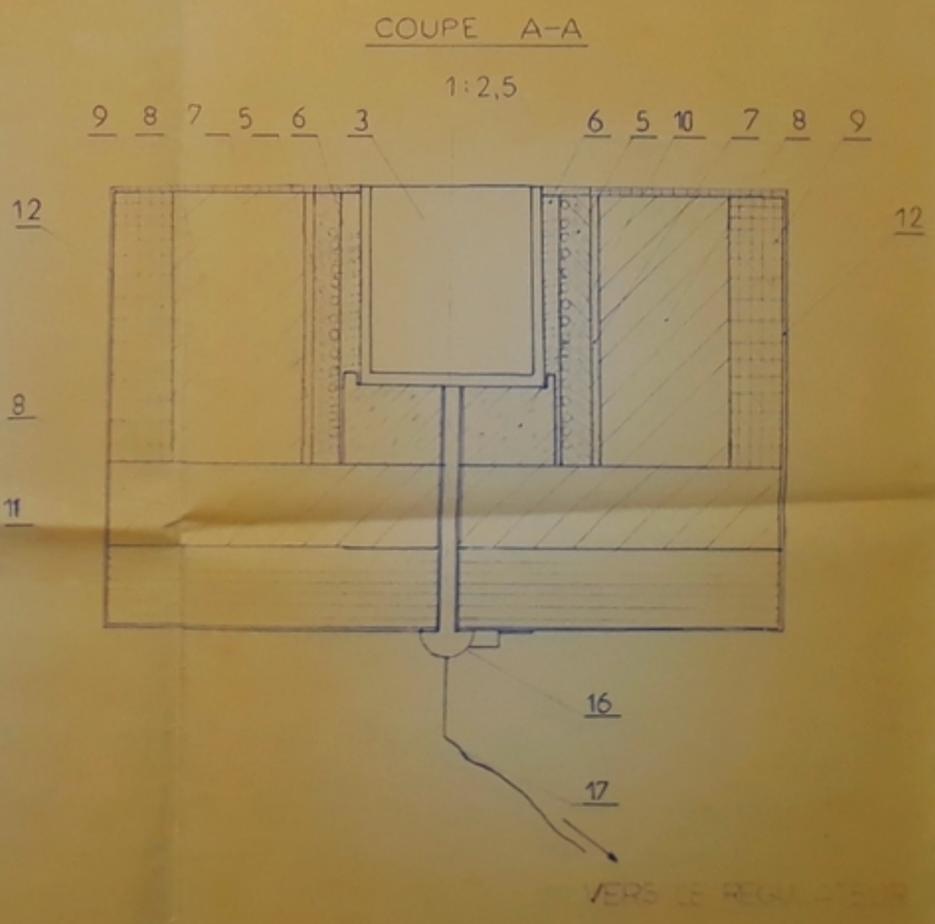
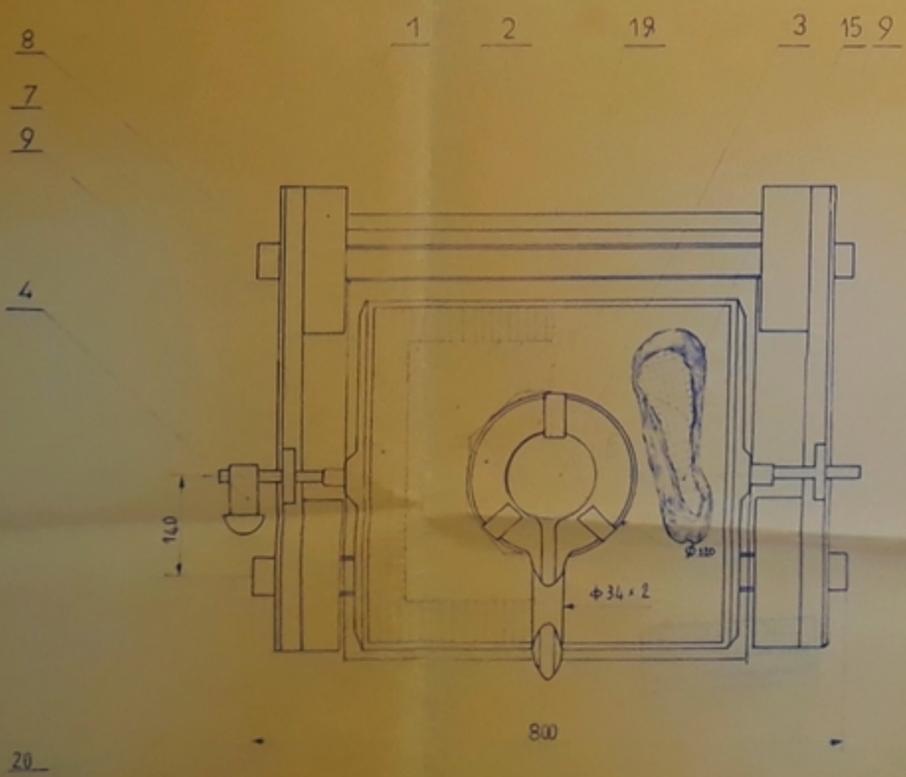
- un électronicien ;
- un mécanicien ;
- et un métallurgiste .

## B I B L I O G R A P H I E

- (1) M. O R F E U I L                      ELECTROTHERMIE INDUSTRIELLE  
ED. DUNOD        PARIS        1980
- (2) F. LAUSTER                            MANUEL D'ELECTROTHERMIE  
ED. DUNOD        PARIS        1968
- (3) J. F. SACADURA                      INITIATION AUX TRANSFERTS  
THERMIQUES.  
ED. CAST.        LYON        1980
- (4) V. PASCHKIS                            LES FOURS ELECTRIQUES  
INDUSTRIELLES.  
ED. DUNOD        NEW YORK 1952
- (5) J. SEGUIER                            ELECTRONIQUE DE PUISSANCE  
ED. DUNOD        PARIS        1975



الجمعية الوطنية للتقنية  
 المعهد الوطني للتقنية  
 كلية الهندسة - القاهرة



VERS LE REGULATEUR

PL01687  
 Autre

20	1	bec de coulee
19	1	Calotte spherique en terre réfractaire
18	1	Casse électrique du four
17	1	Casse électrique du thermocouple
16	1	Thermocouple
15	1	Couverture extérieure en aluminium
14	1	Régulateur électrique
13	1	Canal de coulee
12	1	Bornes métalliques
11	1	Plancher en ciment
10	1	Sole en tôle et réfractaire (coulée)
9	1	Fibre de verre
8	1	Brûleur refroidisseur isolant
7	1	Fibre céramique
6	1	corde de chaîne
5	1	Cape des résistances en béton
4	1	levier de basculement
3	1	Écrou de four
2	1	Four
1	1	chariot inversé de support

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
 DOSSIER n° 1  
 PROMOTION JUIN 87  
 DEPARTEMENT MINE ET METALLURGIE  
 FOUR ELECTRIQUE DE FUSION BASCULANT  
 ECHELLE 1/5  
 TYPE DE 01-87

