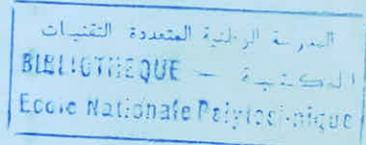


ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT METALLURGIE



PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

SUJET

**ETUDE ET REALISATION
D'UN FOUR ELECTRIQUE DE
TRAITEMENTS THERMIQUES
1 PLANCHE**

Proposé par :

J. KARPATI

Etudié par :

M. LARIBI

M. MELLOULI

Dirigé par :

J. KARPATI

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

S U J E T

ETUDE ET REALISATION D'UN FOUR ELECTRIQUE DE TRAITEMENTS THERMIQUES

Proposé par :

J. KARPATI

Etudié par :

M. LARIBI

M. MELLOULI

Dirigé par :

J. KARPATI

* D E D I C A C E S *

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

/-/

Ma grand mère
Mes parents

M. MELLOULI

D E D I C A C E S



A mes parents qui m'ont donné :
VIE , AMOUR et EDUCATION .

M . O . LARIBI

R E M E R C I E M E N T S

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Nous tenons à remercier **notre promoteur** Mr J.KARPATI pour l'aide fructueuse qu'il n'a cessé de fournir ; Mrs DJEGHLAL et CHITROUB maitres assistants à l'E.N.P ainsi que Mr HAMITI de la fonderie de Rouiba pour leurs assistances matérielles .

Nos vifs remerciements sont adressés à Mr F.BENNAI pour son soutien moral et pratique .

Par l'occasion, nous remercions tous ceux qui de loin ou de près ont participé à notre formation et à la réalisation de ce projet .

T A B L E D E S M A T I E R E S



- CHAP I Notions de traitements thermiques
- I.1: Introduction
- I.2: Différents types de traitements thermiques
- I.3: Facteurs influençants sur les traitements
- I.4: Influence des traitements thermiques sur différents matériaux
-
- CHAP II Notions de transfert de chaleur
- II.1: Introduction
- II.2: Transfert de chaleur par conduction
- II.3: Transfert de chaleur par convection
- II.4: Transfert de chaleur par rayonnement
-
- CHAP III Matériaux et équipements
- III.1: Les fours de traitements thermiques
- III.2: Les résistances électriques
- III.3: Les thermocouples
- III.4: Les matériaux réfractaires
- III.5: Les isolants thermiques
- III.6: Les réfractaires isolants
-
- CHAP IV Régulation des fours
- IV.1: Introduction
- IV.2: Différents types de régulateurs

CHAP V Calcul et conception

V.1:Introduction

V.2:Constitution du four

V.3:Calcul de puissance du four

V.4:Calcul des déperditions thermiques

V.5:Construction du four et choix des
équipements et matériaux qui le constituent

V.6:Régulation du four



I N T E R P R E T A T I O N

C O N L U S I O N

A N N E X E

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

I N T R O D U C T I O N

Les traitements thermiques sont des moyens principaux pour obtenir les caractéristiques mécaniques adéquates d'un matériau métallique choisi pour une conception donnée .

Les équipements servant à réaliser cette tâche sont donc d'une importance primordiale .

Le rôle essentiel des fours de traitements thermiques est d'élever aussi uniformément que possible la température d'une charge jusqu'à une valeur prédéterminée et de l'y maintenir pendant une période donnée .

La partie thermique dans l'établissement d'un projet de four a comme base essentielle les différences de température qui sont toujours accompagnées par des transmissions de chaleur .

Les matériaux réfractaires et isolants constituent l'essentiel des parois composites du four .

Le corps de chauffe représente la source de chaleur, le thermocouple et le système de régulation permettent l'asservissement du four .

CHAPITRE I

NOTIONS DE TRAITEMENTS

THERMIQUES

I.1 : Introduction

On désigne sous le nom de traitement thermique une opération au cours de laquelle une pièce de métal est tout d'abord portée de la température ambiante à une certaine température plus élevée , puis maintenue à cette température pendant un certain temps et enfin ramenée à la température ambiante .

Les effets de ces traitements thermiques dépendent pour un même métal :

1°) De la température

2°) De la durée du maintien de la pièce à cette température

3°) Des vitesses avec lesquelles sont réalisées les opérations de chauffage et de refroidissement .

Le but des traitements thermiques est d'améliorer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques du métal traité . Il arrive parfois que cette amélioration soit accompagnée de l'affaiblissement d'une autre propriété mécanique du métal , aussi pratiquement la trop grande intensité de l'effet d'un traitement thermique doit-elle souvent être atténuée par l'action d'un autre traitement antagoniste .

Jusqu'à la fin du XIX siècle, l'empirisme le plus complet a régi la pratique des traitements thermiques . Aujourd'hui de nombreuses expériences ont permis de donner à la technique de ces traitements une base réellement scientifique est d'établir des règles

rationnelles qui dans de nombreux cas tout en confirmant les pratiques traditionnelles ont permis de leur apporter d'importants perfectionnements .

I.2 :Différents types de traitements thermiques

On distingue trois principaux types de traitements thermiques : le recuit , la trempe et le revenu .

I.2.1 :Le recuit

Le recuit consiste en un chauffage jusqu'à une température déterminée par le but visé , suivi d'un maintien isotherme. Le refroidissement se fait soit à l'air calme soit suivant une loi imposée par la nature de l'alliage (par exemple dans le four en un refroidissement naturel ou contrôlé).

Il peut avoir plusieurs buts :

- a) Homogénéiser un alliage coulé soit sur le plan de la structure micrographique, soit sur le plan de la composition chimique .
- b) Rétablir la structure après un écrouissage, un soudage ou un traitement thermique .
- c) Former une structure favorable à la mise en forme par un usinage ou emboutissage ou écrouissage etc...
- d) Réduire les contraintes internes
- e) Préparer le matériau pour un traitement thermique ultérieur en partant d'une structure appropriée .

En règle générale, le grain obtenu est d'autant plus gros que la température du recuit est élevée , que

le temps est long et que la vitesse de refroidissement est plus faible .

I.2.2 :La trempe

La trempe est l'opération qui consiste à refroidir brusquement un produit métallurgique porté à une température élevée bien définie, afin d'en modifier les propriétés .

Les modifications obtenues sont variables, suivant les produits, dans le cas des aciers durs et mi-durs on recherche une augmentation de la dureté, dans le cas des aciers doux une homogénéisation, pour les bronzes une augmentation de la malléabilité .

I.2.3 : Le revenu

Le revenu est un traitement thermique effectué sur un produit trempé, de manière à tendre vers l'état d'équilibre physico-chimique en formant une structure plus proche de celui-ci .

Il consiste en un chauffage à une température inférieure à la température de trempe .

Le revenu peut avoir pour buts :

- a) Soit un adoucissement comme pour des aciers après une trempe martensitique complète .
- b) Soit un durcissement pour les alliages Al-Cu par exemple ou encore pour le cas des aciers après trempe incomplète .

c) Soit une relaxation des contraintes internes dues au refroidissement brutal lors de la trempe .

I.3 :Facteurs influençants les traitements thermiques

Les principaux facteurs pouvant influencer les traitements thermiques sont :

- a) La composition chimique du matériau .
- b) La température de chauffage θ_c
- c) La durée du maintien à la température θ_c
- d) Le milieu et la vitesse de refroidissement .

I.4 :Influence des traitements thermiques sur différents matériaux

Dans ce qui suit , nous verrons l'effet et la température de chacun de ces traitements sur différents matériaux et alliages .

I.4.1 :Les aciers

I.4.1.1 :Le recuit

Suivant le cas le chauffage se fera au-dessus, au-dessous ou dans les limites de l'intervalle critique A_1 - A_3 ou $A_1 - A_{cm}$. Par contre le refroidissement sera toujours lent (à l'air calme ou dans le four suivant une loi imposée) .

Après un tel traitement, la structure micrographique sera constituée de ferrite et perlite pour les aciers hypoeutectoides ou de perlite et cémentite pour les aciers hypereutectoides .

Pour les aciers alliés , la cémentite sera

remplacée par des carbures complexes du type M_7C_3 ou $M_{23}C_6$, le symbole M pouvant désigner le chrome, le vanadium, le tungstène etc ...

Pour les aciers, on effectue différents types de recuit tels que :

a) Le recuit de régénération :

Le recuit de régénération consiste en un chauffage à une température supérieure (de 30 à 50°C) que la limite supérieure Ac_3 , un maintien bref et un refroidissement peu rapide.

La fourchette de chauffage des aciers au carbone peut être comme suit :

%C	Température du recuit en °C
0 à 0,10	950 à 880
0,10 à 0,30	880 à 840
0,30 à 0,50	840 à 810
0,50 à 1,00	810 à 790

b) Le recuit d'adoucissement :

Le chauffage s'effectue à quelques dizaines de

degrés au-dessous de Ac_1 . Le refroidissement se fait à l'air calme .Il améliore l'usinabilité et rend la structure plus fine .

c) Le recuit de coalescence :

Pour faciliter l'usinabilité de certains aciers (tel 100 C 6 pour roulements), on recherche une cémentite et des carbures coalescés .

Pour ce faire , on fait :

-- Soit un chauffage juste au-dessous de Ac_1 , un maintien prolongé et un refroidissement à vitesse convenable .

-- Soit un chauffage à une température juste inférieure à Ac_1 puis chauffage et refroidissement alternés autour de cette température et un refroidissement final .

d) Le recuit de détente :

Il a pour but la suppression des contraintes internes . Il est en général pratiqué sur des pièces brutes de moulage .Le chauffage se fait à la température la plus basse possible .

e) Le recuit de diffusion ou d'homogénéisation :

On l'utilise pour les pièces en acier moulé pour faire disparaître l'hétérogénéité et égaliser la composition chimique dans toutes les sections.

La température utilisée est de l'ordre de 1000 à 1100°C pour améliorer le phénomène de diffusion .

I.4.1.2 : La trempe

Suivant la loi du refroidissement adoptée , le

le diagramme Fer-Carbone, elle dépend donc des % de carbone et de la composition chimique .

-- Pour les aciers hypoeutectoides : On recommande une température de $Ac_3 + (30 \text{ à } 50^\circ\text{C})$ pour avoir une bonne dureté et une bonne résistance à la rupture .

-- Pour les aciers hypereutectoides : La température de trempe est égale à $Ac_1 + (30 \text{ à } 50^\circ\text{C})$.

I.4.1.3 : Le revenu

Son but est de diminuer les effets excessifs de la trempe. Le chauffage de l'acier trempé s'effectue à une température inférieure à Ac_1 .

On distingue trois types de revenu :

-- Le revenu à basse température qui s'effectue à 250°C .

-- Le revenu à moyenne température qui se fait entre 350° et 500°C .

-- Le revenu à haute température qui se fait entre 500° et 680°C . Il donne à l'acier la structure de sorbite de revenu .

I.4.2 : Les fontes:

Les traitements thermiques sont variables avec la nature des fontes, la forme de la pièce et le but à atteindre . On utilise en général :

-- Le traitement de relaxation des contraintes de coulée et stabilisation dimensionnelle :

Pour rendre la perlite obtenue brute de coulée plus homogène et plus fine on applique aux fontes un traitement de normalisation comme dans le cas des

aciers.

Cette normalisation consiste en une trempe à l'air calme et se fait entre 850° et 900°C .

-- L'adoucissement par recuit :

C'est un traitement thermique de coalescence de la perlite qui se fait à la température voisine de A_{c_3} pour améliorer l'usinabilité .

--L'amélioration par trempe et revenu :

Pour les fontes lamellaires et les fontes malléables , on n'utilise pas de traitements thermiques en effet on peut les obtenir brutes de coulée.

Pour les fontes grises et blanches ordinaires, on évite la trempe à l'huile .

Cependant on utilise la trempe suivie d'un revenu pour les pièces en fontes sollicitées statiquement et dynamiquement afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques .

I.4.3 : L'Aluminium et ses alliages

Les principaux traitements thermiques sont :

-- Les traitements d'homogénéisation pratiqués sur les produits coulés.

-- Les traitements d'adoucissement par recuit appliqués en cours ou en fin de transformation .

-- Une maturation ou / et un revenu produisant le durcissement.

CHAPITRE II

NOTIONS DE TRANSFERT DE
CHALEUR

Les températures de ces traitements sont choisies d'après les diagrammes de l'Aluminium avec les différents éléments d'alliages ,et suivant les buts visés .

I.4.4 : Le Cuivre et ses alliages :

Les divers traitements thermiques classiques (recuit ,trempe, revenu,durcissement physico-chimique)s'appliquent également au cuivre et à ses alliages sur produits moulés ou sur produits formés .

Les températures , les temps de maintiens sont également choisis d'après la nature de l'alliage et les buts visés .

-----o-----o-----o-----o-----o-----o-----o-----

D'après ces breves notions données sur les traitements thermiques ,leurs températures d'utilisation et en tenant compte des matériaux et des traitements utilisés dans le laboratoire de métallurgie,on a opté pour une température maximale de notre four de 1100°C capable de couvrir la gamme de traitements citée préalablement .

II.1 :Introduction:

Les lois de la transmission de chaleur sont d'importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement de nombreuses formes de fours, de réchauffeurs, de refroidisseurs et d'évaporateurs utilisés dans diverses industries .

L'expérience montre que deux corps isolés de l'ambiance et à températures différentes échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à disparition complète de leur différence de température; Le plus chaud cède de la chaleur au moins chaud de sorte que leurs températures tendent à s'uniformiser.

Ce transfert de chaleur peut s'effectuer suivant trois mécanismes différents : la convection, la conduction et le rayonnement.

En réalité, tout échange thermique s'effectue simultanément sous les trois formes précédentes mais généralement l'une d'elles est prédominante et les autres peuvent être négligées .

II.2 :La convection :

Lorsqu'un solide est baigné par un fluide en mouvement, de la chaleur est transmise par conductibilité entre le solide et les particules du fluide qui sont à son contact .

Un point déterminé du solide échange de la chaleur successivement avec les différentes particules du fluide.

Deux techniques peuvent être mises en oeuvre lorsque les échanges thermiques entre la résistance et la charge utilisent ce mode de transfert de chaleur . Le fluide assurant ce transfert étant l'air ou l'atmosphère particulière régnant dans le four .

II.2.1: La convection naturelle :

Les différences de température existant dans la chambre de chauffe provoquent un mouvement du fluide qui permet le transfert de chaleur des zones chaudes (les résistances) vers les zones froides (la charge) .

II.2.2: La convection forcée :

Le mouvement du fluide est créé par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques .Ce type de convection peut être de deux natures :

-- Un simple brassage mécanique de l'atmosphère entourant la charge et destiné à homogénéiser la température .

-- Une circulation dirigée de l'atmosphère venant en contact avec les résistances et la charge pour accélérer le transfert thermique tout en assurant une excellente homogénéité de la température .

La convection joue un rôle important surtout dans les fours et étuves fonctionnant à basses températures (jusqu'à 500°C) car dans ce domaine de la température elle peut assurer des densités de puissance plus élevées et une excellente répartition de la température .

II.2.3: Coefficient de convection:

Le flux de chaleur échangé entre un solide et l'ambiance à travers une surface élémentaire entourant un point du solide est donné par :

$$d\phi = \alpha \cdot dS (\theta_a - \theta_s)$$

$d\phi$: Flux de chaleur échangé

dS : Surface d'échange en m^2

α : Coefficient de convection en $W / m^2 \cdot ^\circ C$

θ_a : Température de l'ambiance en $^\circ C$

θ_s : Température de la surface du solide en $^\circ C$.

Le coefficient de convection α n'est pas une grandeur stable car il depend de nombreux facteurs à savoir :

- a) La nature de l'écoulement du fluide.
- b) Les caractéristiques du fluide .
- c) Les caractéristiques de la paroi .
- d) Position du fluide et de la paroi l'un par rapport à l'autre .

A titre d'exemple, l'expression suivante permet d'évaluer α en utilisant des approximations telles que :

$$\alpha = A (\theta_a - \theta_s)^{0.25} \quad \text{Pour les parois planes}$$

$A = 1.8$ 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 .

Pour les parois cylindriques :

$$\alpha = 1.32 \frac{(\theta_a - \theta_s)^{0.25}}{d}$$

d : étant le diamètre du cylindre .

II.3 : La conduction :

La conduction thermique est la propagation de la chaleur de molécule en molécule dans un corps . Il ne faut pas confondre la conduction thermique avec la conduction électrique qui se fait par passage direct du courant dans la pièce à chauffer .

La loi de fourrier traduit la relation qui existe en chaque point d'un corps entre le flux de chaleur et le gradient de température :

$$\phi = -\lambda \cdot \Delta\theta$$

ϕ : Flux de chaleur

λ : Conductivité thermique en $W / m^2 \cdot ^\circ C$

$\Delta\theta$: Gradient de température en $^\circ C$

Le signe (-) signifie que l'écoulement se fait des zones chaudes vers les zones froides .

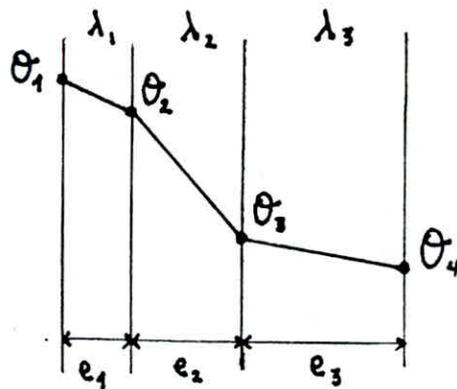
Dans ce qui suit , nous donnerons quelques résultats obtenus pour des corps à forme géométrique simple .

On suppose que le régime est permanent et que le coefficient de conductivité λ est constant :

II.3.1: Paroi composite plane :

Il est rare que les fours à résistances soient constitués d'un matériau unique . Ils comportent en effet une série de matériaux jouant chacun un rôle spécifique (réfractaire , isolant thermique , revêtement anticorrosion ...) .

Si la paroi comprend n plaques dont les faces externes sont à des températures θ_1 et θ_{n+1} et que chaque élément est traversé par le même flux , on a :



$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{e_1 / \lambda_1 S} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{e_2 / \lambda_2 S} = \frac{\theta_3 - \theta_4}{e_3 / \lambda_3 S} = \dots = \frac{\theta_n - \theta_{n+1}}{e_n / \lambda_n S}$$

Ceci donne après addition:

$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{\sum \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S}}$$

$$= \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{R} \quad \text{avec} \quad R = \sum \frac{\left(\frac{1}{r_i} \right) - \left(\frac{1}{r_{i+1}} \right)}{2 \pi \lambda_i}$$

Pour les cas plus complexes ,on retourne à chaque fois aux équations fondamentales en utilisant des combinaisons de méthodes analogiques ou numériques .

Ce mode de transfert de chaleur ne joue (sauf cas particulier) pratiquement aucun rôle dans l'échange thermique entre les résistances et la charge mais il permet de conditionner :

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

Les parois du four doivent donc être faites de matériaux réduisant le plus possible les pertes thermiques .

II.4 :Le rayonnement :

Le rayonnement caractérise l'échange direct de la chaleur entre deux corps à températures différentes séparés par un espace transparent à ce rayonnement . C'est un phénomène électromagnétique .

Ce mode de transfert de chaleur est fondamental dans les fours électriques travaillant à haute température . A partir de 500°C , l'échange thermique entre les résistances et la charge se fait en effet essentiellement par rayonnement et au delà de 750°C , pratiquement de cette seule manière . Il s'ensuit qu'aux basses températures , la plus grande partie de la

chaleur est transmise par convection et conduction tandis qu'aux températures élevées, le rayonnement est le facteur déterminant de cette transmission.

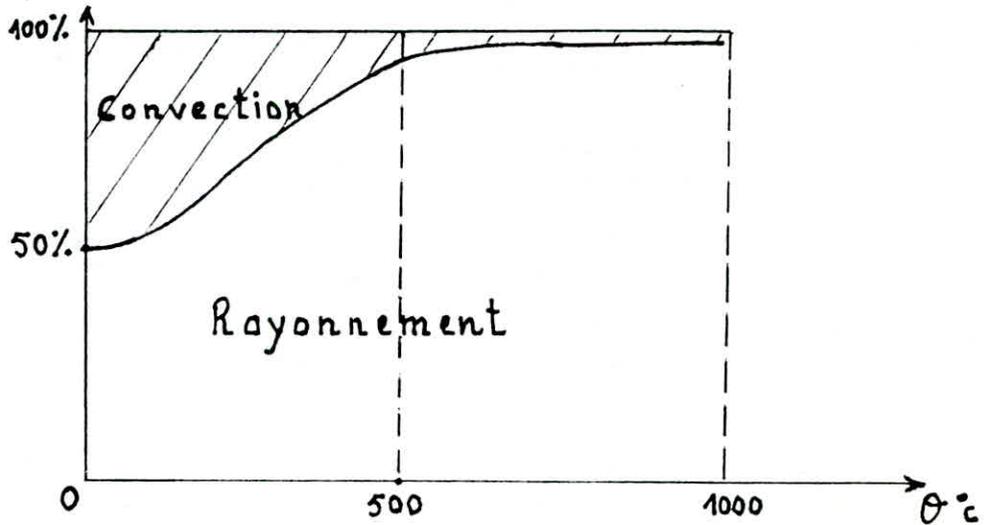


Fig: Repartition du flux thermique entre rayonnement et convection en fonction de la température.

Les échanges thermiques entre les résistances, la charge et les parois obéissent aux lois du rayonnement notamment celle de STEFAN-BOLTZMAN qui permet de calculer les caractéristiques du four à rayonnement.

La transmission de chaleur entre deux surfaces ou deux solides est de la forme :

$$\Phi = \epsilon_{RC} \cdot S.F. \cdot \sigma (T_R^4 - T_C^4)$$

avec :

Φ : Flux de chaleur transmise (Watts)

ϵ_{rc} : Coefficient mutuel de rayonnement tenant compte des émissivités ϵ_R et ϵ_c des résistances et de la charge .

S : Aire de la surface émettrice .

F : Facteur de forme ou d'angle de la surface réceptrice par rapport à la surface émettrice .

σ : Constante de BOLTZMAN = $5,73 \cdot 10^{(-8)} \text{ W / m}^2 \cdot \text{°K}$

θ_R et θ_c : Températures absolues en °K de la résistance et de la charge .

Si l'on considère les surfaces de dimensions finies , on se propose de donner quelques exemples de transfert de chaleur par rayonnement.

II.4.1: Echange entre deux plans parallèles P_1 et P_2 , de facteur d'émission total ϵ_1 et ϵ_2 et de températures θ_1 et θ_2 :

Le flux de chaleur envoyé par le plan P_1 par unité de surface est : $\phi_1 = \sigma \cdot \epsilon_1 \cdot \theta_1^4$; P_2 en absorbe la fraction $\epsilon_2 \phi_1$, le reste, soit $\phi_1 (1 - \epsilon_2)$ est renvoyé vers P_1 qui renvoie de nouveau la fraction $\phi_1 (1 - \epsilon_2)(1 - \epsilon_1)$ vers P_2 et ainsi de suite .

Au total P_2 absorbe une densité de flux égale à :

$$\begin{aligned} \phi_{1-2} &= \phi_1 \cdot \epsilon_2 \cdot [1 + (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) + (1 - \epsilon_1)^2 (1 - \epsilon_2)^2 + \dots] \\ &= \sigma \theta_1^4 \epsilon_1 \epsilon_2 \frac{1}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)} \end{aligned}$$

De même la densité de flux issue de P_2 et absorbée par P_1 est :

$$\phi_{2-1} = \sigma \theta_2^4 \epsilon_1 \epsilon_2 \frac{1}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)}$$

Le flux total échangé par unité de surface est :

$$\Phi = \Phi_{1 \rightarrow 2} - \Phi_{2 \rightarrow 1} = \sigma (\theta_1^4 - \theta_2^4) \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)}$$

$$\Phi = \sigma (\theta_1^4 - \theta_2^4) \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

II.4.2: Echange entre deux spheres concentriques ou entre deux cylindres coaxiaux :

Appelons S_1 la surface interieure et S_2 la surface exterieure , θ_1 et θ_2 les températures et ϵ_1 et ϵ_2 les facteurs d'émission correspondants :

$$\Phi = S_1 \cdot \sigma \cdot (\theta_1^4 - \theta_2^4) \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$$

Un cas particulier (corps limité rayonnant dans une grande enceinte) correspond à S_1 / S_2 faible donne :

$$\Phi = S_1 \cdot \sigma \cdot (\theta_1^4 - \theta_2^4) \epsilon_1 .$$

-----°-----°-----°-----°-----°-----°-----°-----°-----°-----

Cette étude des differents modes de transfert de chaleur donne la possibilité de déterminer les pertes thermiques par les parois du four , la distribution de la température dans les parois , la vitesse de montée en température des corps à chauffer , la distribution de la température à l'intérieur de ces corps , l'isolation thermique optimale des équipements thermiques etc ...

C H A P I T R E I I I

M A T E R I A U X E T E Q U I P E M E N T S

III.1 :Les fours de traitements thermiques

III.1.1:Introduction:

Nous avons dit auparavant qu'afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques d'un matériau , il était inévitable d'utiliser un four de traitement thermique.

De grands progrès ont été réalisés ces dernières années dans la conception des fours en général et ceux des traitements thermiques en particulier .

Bien que l'utilisation des fours à chauffage électrique est actuellement la plus répandue dans les traitements thermiques , néanmoins les fours à chauffage par combustion trouvent encore un domaine d'utilisation jusqu'à ce jour.

Pour donner un aperçu sur les différents fours destinés aux traitements thermiques, nous citons dans ce qui suit quelques uns d'entre eux .

III.1.2:Différents types de fours de traitements thermiques:

On distingue trois familles de fours :

III.1.2.1:Fours utilisés pour les demi-produits (fils,tubes,bandes,...)

a)Four à cloche :

Il se compose d'une sole fixe et d'une cloche circulaire ou rectangulaire .Les fils résistifs sont placés sur les piédroits de la cloche .Ce type de four nécessite un dispositif mécanique ou autre pour soulever la cloche .

Sa capacité est importante, généralement de quelques tonnes à une centaine de tonne .

b) Four à élévateur :

L'introduction des charges et leur extraction se fait par l'intermédiaire d'un sas .Un dispositif mécanique ou autre permet d'élever les charges jusqu'au sas .Sa puissance varie de quelques KW à plusieurs centaines de KW et sa capacité varie de quelques m³ à 100 m³ .

c)Four continu à longerons:

L'enfournement et le défournement des pièces se fait à l'aide de longerons .La puissance de ce four varie de quelques KW à plusieurs centaines de KW .

d)Four à tube mouflé :

Ce type de four est constitué par une enceinte chauffante au centre de laquelle passe un tube mouflé qui aboutit à la zone de refroidissement .

Le produit à traiter est entraîné dans le tube mouflé à l'aide de deux rouleaux tournants en sens inverse .

e)Four à rouleaux commandés:

Dans ce type de four, les produits à traiter sont entraînés dans la chambre de chauffe par l'intermédiaire d'un jeu de rouleaux qui sont entraînés par un moteur .

f)Four à pôt:

C'est un four vertical dans lequel on chauffe des pôts contenant les produits à traiter .

Le pôt est en acier réfractaire .

g)Four à sole fixe:

C'est un four discontinu, il est simple et classique ,son chargement est manuel ou assuré par des chargeuses mécaniques en fonction du volume et du poids des produits à chauffer.Le volume de la chambre à chauffer est de quelques m³ .

h)Four à sole mobile :

Ce four est facile à utiliser grâce à la mobilité de la sole , cette dernière sort du four ce qui facilite le chargement et le déchargement des produits à chauffer La charge de ce four varie de quelques tonnes à plusieurs dizaines de tonnes .

i)Four continu à traction:

Ce four est constitué d'une chambre de chauffe juxtaposant une chambre de refroidissement dans lesquelles passent des bandes et des tôles qui sont entraînées par un système de traction constitué par un jeu de cylindres tournants .

j)Four à pousseuse:

Ce four dérive directement du four à sole horizontale par l'adjonction en sole d'un système de rails , de galets ou de boulets,permettant aux pièces de se pousser les unes les autres sans frottement excéssif sur la sole .Une pousseuse extérieure assure l'avancement des pièces ,ce peut être une pousseuse mécanique,un verin hydraulique ou pneumatique etc...

III.1.2.2:Fours utilisés pour les pièces brutes (moulées, forgées ,...)

a)Four à sole fixe ou mobile

b)Four à élévateur

c)Four à tablier métallique :

Les produits à traiter sont transportés par un tablier métallique jusqu'à l'intérieur du laboratoire du four. Sa puissance varie de quelques KW à plusieurs centaines de KW .

d)Four à cloche

e)Four puit:

Il est caractérisé par une section presque toujours circulaire et une profondeur plus grande que le diamètre ($H > 3/2 D$).

III.1.2.3:Fours utilisés pour les pièces mécaniques

a)Four à tablier

b)Four à pôt

c)Four à sole vibrante :

L'avancement des produits est obtenu en faisant vibrer la sole par l'intermédiaire d'un vibreur électromagnétique . Ce four est utilisé pour le traitement des petites pièces en vrac ,il fonctionne généralement en continu et est entièrement automatisé .

d)Four continu ou discontinu à bac de trempe incorporé

Ce type de four permet le défournement des pièces dans le bac de trempe pour éviter tout refroidissement à

l'air.

Son avantage est l'obtention de pièces à dureté très précise .

e)Four à chambre à convection forcée ou non :

La chambre de chauffe de ces fours est pourvue d'une ouverture à travers laquelle de l'air peut rentrer .

f)Four vertical mouflé ou non

g) Four puit

h)Four à cornue rotative :

Ce four est utilisé pour le traitement de petites pièces :vis,billes de roulements ,rondelles ,...etc

Ces pièces sont véhiculées dans le four à l'aide d'une hélice à l'intérieur de la cornue.Si la cornue comporte deux spirales coaxiales à pas inversés , les pièces qui entrent dans le four se réchauffent par récupération de la chaleur des pièces qui en sortent.

III.2 :Les résistances électriques

III.2.1:Introduction :

le chauffage par les résistances électriques s'est nettement amélioré grâce à l'amélioration continue des matériaux de fabrication des éléments chauffants . on vise une augmentation de la robustesse et de la durée de vie ,une tenue aux atmosphères agressives et un accroissement de la température de fonctionnement .

leur travail ainsi que leur emploi doivent être faciles;Leurs caractéristiques doivent être stables dans les conditions d'utilisation.

Les éléments chauffants résistifs sont classés en trois grandes familles :

- Les résistances métalliques
- Les cermets
- Les résistances non métalliques

III.2.2: Les résistances métalliques :

La confection de ces résistances métalliques utilise plusieurs alliages:

- Les résistances en Fer-Nickel-Chrome ou Nickel-Chrome
- Les résistances en Fer-Chrome-Aluminium
- Les résistances spéciales au Molybdène, Tungstène, Tantale, Platine, Niobium...

III.2.2.1: Les résistances en Fe-Ni-Cr et Ni-Cr:

Ces alliages sont élaborés dans des fours électriques à induction et subissent des traitements thermiques spéciaux. Ils sont très largement utilisés en raison de leurs

multiples qualités (bonne résistance mécanique, forte résistance à l'oxydation et autres atmosphères agressives, absence de vieillissement, facilité de mise en forme et de réparation, coût relativement faible ...). Ils permettent de couvrir un large domaine de température .

Le tableau N°1 en annexe présente les caractéristiques de la famille d'alliages Fe-Ni-Cr et Ni-Cr en fonction de la teneur en Ni et en Cr .

III.2.2.2: Les résistances en Fe-Cr-Al :

Ces alliages contiennent de 20 à 30 % de Cr, 2 à 6 % d'Al, le reste étant le Fer .

Ces résistances sont utilisées dans les fours fonctionnant aux températures proches de 1300°C . Leur résistance mécanique n'est pas très élevée ainsi que leur durée de vie .

Le tableau N°2 en annexe donne certaines des caractéristiques essentielles .

III.2.2.3: Les résistances spéciales

Pour obtenir des températures élevées , on a recourt à des métaux et alliages spéciaux à haut point de fusion mais pour la plupart coûteux .

-- Platine, Platine-Rhodié et Rhodium :

Les caractéristiques principales sont résumées dans le tableau N°3 en annexe .

Leurs températures de fonctionnement sont très élevées mais le coût du Platine a beaucoup limité l'utilisation de ce type de résistances .

-- Résistances en Molybdène:

Le Molybdène s'oxyde à partir de 400°C et sa vitesse d'oxydation croît à partir de 600°C .

Les résistances en Molybdène doivent donc être utilisées dans les fours sous vide ou à atmosphère contrôlée.

-- Résistances en Tungstène :

La température d'emploi du Tungstène est plus élevée que celle du Molybdène car sa température de fusion est plus haute .

Le Tungstène s'oxyde à partir de 500°C ;il faut donc recourir au vide ou à une atmosphère neutre .

-- Résistance en Tantale:

Ces résistances s'utilisent sous vide ou gaz neutre . En effet ,à l'air il y'a oxydation à partir de 500°C et nitruration à partir de 700°C .

-- Résistances en Niobium:

Ce métal a une température de fusion de 2500°C . Son prix est très onéreux et il n'est pratiquement pas employé comme élément chauffant de four .

Le tableau N°4 en annexe résume les caractéristiques essentielles de ces résistances spéciales .

III.2.3: Les cermets :

Le mot "cermet" est une contraction de l'expression "céramique-métal" . Ces résistances sont composées de métaux et de métalloïdes sous forme de céramiques frittées à haute température .

Selon le matériau de base utilisé on distingue trois catégories de cermets .

III.2.3.1: Les résistances en bisiliciure de molybdène:

Le matériau de base est le bisiliciure de molybdène MoSi_2 .

Ces résistances sont utilisées pour des températures voisines de 1700°C .

Leur résistivité est variable avec la température comme l'indique la figure suivante :

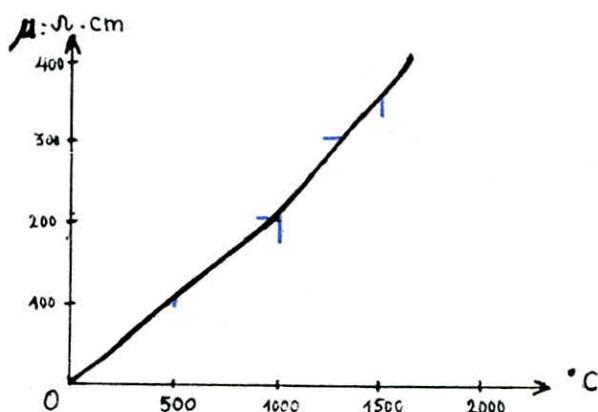


Fig: Evolution de la résistivité en fonction de la température.

A partir de 980°C , le MoSi_2 se combine avec l'oxygène de l'air pour former une couche de Silice SiO_2 qui protège le matériau des attaques chimiques .

L'action réductrice de certaines atmosphères sur la Silice oblige à limiter la température de fonctionnement de l'élément .

Les éléments en MoSi_2 ne sont pas adaptés au chauffage des fours sous vide poussé .

III.2.3.2: Les résistances en chromite de lanthane :

Ces résistances sont constituées principalement d'oxyde de chrome et d'oxyde de lanthane (chromite de lanthane). La température de fusion est de 2500°C et la température limite d'emploi est 1850°C alors que la durée de vie est très faible .

On les emploie dans les petits fours de laboratoire .

III.2.3.3: Les résistances au Zirconium:

La partie chauffante de ces résistances en céramique frittée est constituée de Zirconium ZrO_2 . Ces résistances sont utilisées dans les fours de laboratoire travaillant jusqu'à 2200°C en atmosphère oxydante .

III.2.4: Les résistances non métalliques:

Cette famille de résistances comprend essentiellement des éléments chauffants en Carbone et en Carbure de Silicium

III.2.4.1: Les résistances en carbone:

Le carbone peut être utilisé sous ses deux variétés allotropiques

-- Le carbone amorphe

-- Le graphite synthétique

Les éléments en carbone amorphe sont réalisés sous pression , alors que ceux en graphite sont fabriqués au four électrique à haute température à partir du carbone amorphe .

Le tableau N°6 en annexe donne certaines de leurs caractéristiques.

III.2.4.2: Les résistances en carbure de silicium:

Le carbone s'oxydant à l'air ; on a donc fabriqué des résistances en carbure de Silicium pur qui résiste à

l'oxydation .Ce materiau est élaboré au four à arc .

La résistivité est très élevée et la température d'emploi varie entre 1500°C et 1650°C .Les éléments chauffants en carbure de Silicium permettent de travailler dans la plupart des atmosphères de l'industrie.Ils ont une durée de vie très longue surtout pour les fours continus.

-----o-----o-----o-----o-----o-----o-----o-----

L'élément chauffant est choisi au dépend d'un grand nombre de considérations , à savoir :

- La puissance électrique nécessaire
- Le volume de la chambre de chauffe
- La surface disponible pour les loger
- La nature du courant d'alimentation
- La nature du traitement à effectuer
- La température d'emploi
- La nature de la régulation

III.3 : Les thermocouples :

III.3.1 : Introduction :

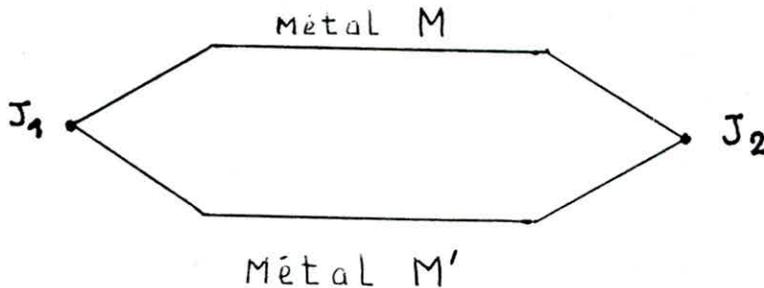
Considérons deux conducteurs soudés entre eux aux deux extrémités J_1 et J_2 . Chaque conducteur est constitué d'un métal homogène mais différent de l'autre.

Soit θ_1 la température de J_1 et θ_2 la température de J_2 .

Si $\theta_1 = \theta_2$: aucun courant ne circule dans la boucle.

Si $\theta_1 > \theta_2$: il circule un courant dans un certain sens.

Si $\theta_1 < \theta_2$: le sens du courant est inversé.



Pour une différence de température $\Delta\theta$ donnée, l'intensité du courant dépend de la nature des métaux M et M'.

Si on intercale dans un des conducteurs (M par exemple), un troisième conducteur, celui-ci ne perturbera pas le fonctionnement de l'ensemble pourvu que ses deux raccords soient à la même température. Cette loi nous permet de placer un galvanomètre par exemple dans le conducteur M pour mesurer le courant de circulation.

Lorsque deux conducteurs métalliques sont en contact et en équilibre thermique, il existe entre eux une différence

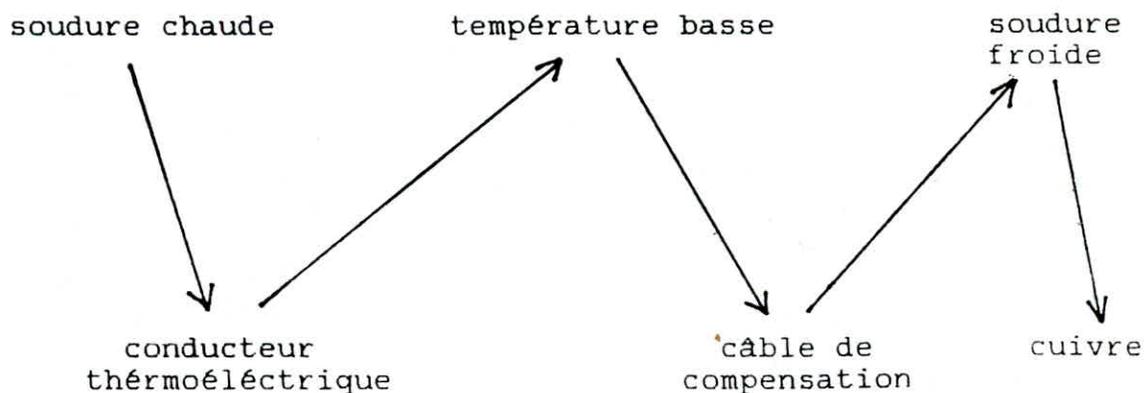
de potentiel qui dépend de la nature des métaux et de la température de jonction .

Entre deux points d'un conducteur, il existe une différence de potentiel si les températures de ces deux points sont inégales .

Les câbles de compensation :

Entre la soudure chaude et la soudure froide , les conducteurs devraient être constitués par des métaux homogènes . Cette obligation est facile à respecter tant que la distance entre les deux soudures est faible . Mais il peut y avoir plus de cent mètres entre les deux points; les conducteurs du thermocouple sont chers . Pour ces raisons, on utilise souvent des câbles dits de compensation qui sont des câbles moins onéreux, plus pratiques d'emploi, qui ont des forces électromotrices voisines de celles du thermocouple proprement dit mais qui ne peuvent supporter des températures élevées .

La chaîne est donc la suivante :



La liaison donc entre le thermocouple est. l'appareil de mesure est effectuée par un câble de compensation bifilaire qui doit avoir à peu près les mêmes caractéristiques thermoélectriques que les fils du thermocouple qu'il remplace dans cette zone de température . Il existe pour chaque thermocouple un type de câble de compensation spécifique .

III.3.2 : Les différents couples :

On peut pratiquement constituer un couple thermoélectrique avec deux fils métalliques quelconques mais différents;seulement à moins de disposer de moyens d'étalonnage,on ne saura pas relier la tension mesurée à la température ; il faut aussi que le thermocouple résiste à l'environnement,être aisement reproductible et compatible avec l'appareil de mesure et de régulation . C'est pourquoi,il ne faut utiliser que des couples fabriqués par des spécialistes .

Différents couples sont donc utilisés et répondent aux exigences citées préalablement .

Couple fer/Constantan : Type J :

Il a un haut pouvoir thermoélectrique et n'est pas cher . Il convient de préférence aux atmosphères réductrices et peut être utilisé de -190°C à 800°C .

Le pôle (+) est le Fer .

Couple Cuivre/Constantan : type T :

Il est plus précis que le type précédent et permet de faire de très petits thermocouples . On l'utilise de -190°C à $+350^{\circ}\text{C}$, au delà, le cuivre s'oxyde très rapidement .

Le pôle (+) est le Cuivre .

Couple Chromel/Alumel : type K :

Thermocouple correspondant à une marque déposée par la société HOSKINS qui est la seule au monde à fabriquer les matériaux nécessaires à leur fabrication .

Le Chromel (conducteur positif) correspond à un alliage de (11) onze constituants avec essentiellement dix fois plus de nickel que de chrome .

L'Alumel contient (12) douze composants avec surtout du nickel et en plus faible proportion de l'Aluminium , du Silicim et du Manganèse.

C'est un thermocouple très stable qui délivre une force électromotrice presque proportionnelle à la température et qui résiste aux atmosphères oxydantes .

La norme prévoit son utilisation de -200°C à 1370°C , mais en pratique on ne l'utilise pas au delà de 1100°C .

Sa précision est de $+2,2^{\circ}\text{C}$ de 0°C à 277°C et de $0,75\%$ à $0,375\%$ de la température mesurée jusqu' à 1260°C .

Les câbles de compensation sont de trois types :

--Du Nickel-Chrome pour le positif et du Nickel allié pour le négatif .

--Du Fer pour le positif et du cupro-nickel pour le négatif

--Du Cuivre pour le positif et du Constantan pour le négatif

Couple Chromel/Constantan : type E :

C'est une marque également déposée par la société HOSKINS . Ce couple donne une force électromotrice élevée.

On l'utilise jusqu'à 870°C avec une erreur de (+/-) 1,7°C entre 0°C et 310°C et de 0,5% de 310°C à 870°C .

Couple Platine-Rhodié à 10% / Platine : type S :

C'est le thermocouple de référence entre 630°C et 1063°C . Il est très stable et ses constituants peuvent être très purs . On l'utilise industriellement jusqu'à 1600°C mais il a un faible pouvoir thermoélectrique .

La précision garantie est de (+/-) 2,8°C de 0°C à 538°C et (+/-) 0,5°C de 538°C à 1482°C .

Le câble de compensation a son positif en Cuivre repéré en jaune , son négatif (cupronickel) en vert . Utilisable de 0°C à 100°C .

Couple Platine-Rhodié à 13% / Platine : type R :

Il est moins cher que le type S . La norme donne les mêmes recommandations que celui du type S .

Habillage des thermocouples :

Dans les problèmes d'habillage, il faut distinguer :

-- Le thermocouple proprement dit .

- Les câbles de compensation .
- Les cannes , les perles , etc ...

III.3.3: Fabrication des thermocouples

Les deux fils ayant été coupé à la longueur requise, il est nécessaire de les dresser pour faciliter le montage des isolateurs. On relie les deux fils à leurs extrémités par une torsade d'environ $3/2$ de tours .

On serre un chalumeau dans un étau de façon que sa flamme soit horizontale . On présente la torsade à la pointe du bleu pâle de la flamme jusqu'à ce que les deux fils soient rouge vif .

On trempe alors la torsade dans un bain décapant et on la reporte tout de suite dans la flamme jusqu'à ce qu'une petite boule apparaisse à l'extrémité du couple .

La soudure étant terminée et légèrement refroidie, on agite l'extrémité du couple dans l'eau froide afin de refroidir complètement .

On monte les perles (isolateurs) une à une tout le long des fils qu'on protégera par une gaine en céramique de préférence en laissant un centimètre entre le bout soudé du thermocouple et la paroi de la gaine pour éviter le contact

Ce travail a été effectué à la S.N.V.I et nous a permis de réaliser le thermocouple .

Des tables donnant la f.e.m en millivolts en fonction de la température de la soudure chaude prise de 10°C en 10°C pour les différents types de thermocouples sont données en annexe .

III.4 : Matériaux réfractaires :

Les matériaux réfractaires sont des produits minéraux non métalliques dont le point de fusion est supérieur à 1500°C . Ces matériaux constituent le garnissage situé en face chaude des parois du four .

Des qualités optimales sont exigés pour une meilleure utilisation de ces produits :

-- Qualité thermique :

Leur température de fusion doit être élevée et largement supérieure à celle d'emploi du four . La capacité calorifique et surtout la conductivité thermique doivent être les plus faibles possibles .

-- Qualité mécanique :

Ils doivent présenter une excellente résistance mécanique à la température d'emploi , en particulier les résistances aux chocs thermiques , aux compressions et aux dilatations .

-- Qualité chimique :

La résistance aux actions chimiques provoqué des atmosphères , des charges ou des résistances électriques doit être élevée .

-- Qualité électrique :

Aux températures élevées, la résistance d'isolement électrique doit être élevée .

-- Qualité morphologique :

Ces produits doivent être facilement usinables ,

élaborables sous toutes les formes et les dimensions .

-- Qualité économique :

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

Ces qualités doivent rester inchangées jusqu'à la température finale du four .

Il existe trois grandes familles de réfractaires réparties comme suit :

-- Les produits acides ou Silico-Alumineux .

-- Les produits basiques .

-- Les produits spéciaux .

III.4.1 : Les produits Silico-Alumineux :

Ces sont des produits acides allant par ordre de performance croissante de la Silice pure à l'alumine pur en passant par tous les Silicates d'Alumine .

a) Produits de Silice :

Ces matériaux doivent contenir au minimum 93% de Silice pure (SiO_2). Les matières premières utilisées sont :

-- Les quartzites qui contiennent jusqu'à 97% de Silice

-- Les arkoses qui sont moins purs que les quartzites car elles présentent des impuretés (argile et Fieldspaths)

-- Les silex : facilement transformables sous l'action de la chaleur .

b) Les produits semi-Siliceux :

Ils sont intermédiaires entre les produits Silico-Argileux et les produits de silice.

Dans cette catégorie , on classe généralement les produits titrant de 85 à 93 % de Silice . Ils sont fabriqués à partir de sable argileux traités et cuits .

c) Les produits Silico-Argileux à faible teneur en Alumine :

Dans ces produits , la teneur en alumine est comprise entre 10 et 32% . La teneur en argile varie de 21 à 66% , le reste étant de la silice et quelques impuretés diverses . Ces produits à faible teneur en alumine sont classés en trois catégories :

--Produits très peu alumineux : soit 10 à 15 % d'alumine

($Al_2O_3 + TiO_2$)

--Produits moyennement alumineux : soit 20 à 22 % d'alumine

--Produits plus alumineux : ayant 28 à 32 % d'alumine

d) Produits Silico-Argileux à haute teneur en Alumine:

Ils sont en général divisés en deux groupes:

-- Groupe I :

Il réunit les produits dont la teneur en Alumine est supérieure à 58% et qui sont constitués par l'une des matières suivantes :

- * La Bauxite
 - * La Gibbsite
 - * La Cyanite
 - * La Sillimanite
 - * L'Andalousite
 - * La Mullite synthétique
 - * Le Corindon
- Groupe II :

C'est les produits titrant de 46 à 58% d'Alumine (Al_2O_3 + TiO_2) .

Les propriétés sont intermédiaires entre celles des matières premières mélangées pour obtenir la composition recherchée telles que :

- * Argile + Alumine
- * Argile + Gibbsite
- * Argile + Andalousite , etc ...

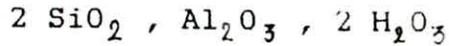
e) Produits Argileux :

Les argiles sont des minéraux et par conséquence des roches . Les vraies argiles réfractaires sont des sillicates d'Alumine hydratés purs ou des mélanges appartenant au groupe de la Kaolinite .

Les minéraux de ce groupe sont :

- * La Kaolinite proprement dite
- * Le mineral des Argiles réfractaires
- * L'Halloysite
- * La Anauxites

-- La Kaolinite est le disilicate d'Alumine hydraté



-- Le minéral des Argiles réfractaires est de même formule que la Kaolinite, mais plus plastique .

-- L'Halloysite : de formule $\text{Al}_2\text{O}_3 , 2 \text{SiO}_2 , 4 \text{H}_2\text{O}$ et très plastique .

-- Les Anauxites : elles ont la forme chimique suivante :
deux ou trois molécules de Silice pour une d'Alumine.

-- L'Allophane est soit une variété d'Halloysite plastique soit un gel d'Alumine et de Silice .

III.4.2 : Produits basiques à basse teneur en Magnésie Chromite et Dolomie :

La brique de magnésie est essentiellement consistée d'oxyde de Magnésium MgO dont le point de fusion est de 2800 °C .

C'est donc une brique basique par excellence qui résiste bien par conséquent, au contact des matières également basiques même à température élevée . Mais la Magnésie réagit avec les Silicates en donnant des eutectiques fusibles .

La matière première est la Carbonate de Magnésie .

La brique de Chromite ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) est neutre . Elle résiste aux matières acides et basiques . Ses propriétés mécaniques et physiques sont médiocres .

Les deux matières précédentes alliées ont donné des

briques dites de " Chrome_Magnésie" très résistantes .

Enfin la Dolomie : Carbonate double de Calcium et de Magnésium, $MgCa(CO_3)_2$ est transformée par Calcination en un mélange des deux oxydes: Chaux CaO et Magnésie MgO . Ce mélange est extrêmement réfractaire, ayant un point de fusion supérieur à $2300^{\circ}C$. Ces oxydes sont tous deux basiques .

III.4.3 : Produits spéciaux :

On désigne sous ce nom tous les produits réfractaires autres que ceux déjà cités et qui sont :

-- Les produits au carbure de Silicium : SiC

C'est un mélange de Silice (sable) et de coke, il a une bonne conductibilité . On l'emploie souvent pour la fabrication des creusets .

-- Les produits à base de graphite :

Le graphite est rigide et un bon conducteur de chaleur On l'utilise pour la fabrication des creusets à fondre les métaux .

-- Les produits de Zircone (ZrO_2) et Zircon ($ZrSiO_4$)

La Zircone (ZrO_2) est très réfractaire et résiste aux oxydes basiques.

Le Zircon ($ZrSiO_4$) : Son utilisation est limitée car, vers $1800^{\circ}C$, il se dissocie en deux phases ZrO_2 et SiO_2 .

-- Les produits de laboratoire :

Les plus utilisés sont les porcelaines réfractaires , la Silice fondue et l'Alumine frittée .

-- Les produits réfractaires Anti-Acides :

Ces produits sont fabriqués à partir d'argiles spéciales à haute résistance pyroscopique .

-- Les produits réfractaires non-poreux :

La porosité des produits réfractaires joue un rôle considérable dans leur résistance à la corrosion chimique car les pores sont une voie de pénétration d'agents agressifs .

La recherche d'une moindre porosité et d'une moindre perméabilité a permis de fabriquer deux types de matériaux réfractaires non-poreux :

a) Les produits Electro-fondus :

Ils sont soit à base d'alumine soit de mullite et corindon soit de zircone et corindon obtenus par fusion au four électrique .

b) Les produits fondus:

Ces produits sont obtenus par frittage aux hautes températures sans être fondus et sont à base de mullite et corindon .

-- Les produits non façonnés:

Ces produits regroupent les coulis ,les ciments de joints ,les pisés ,les mélanges réfractaires plastiques ,les enduits ,les mélanges projectables .

-- Les coulis : C'est la matière qui sert à maçonner les briques réfractaires et de garnir leurs joints .Elle doit être de même nature que la brique soit argileuse ,siliceuse ou magnésique .

-- Ciments de joints : Utilisés pour les hautes températures; ils durcissent à l'air .

-- Pisés : Ce sont des mélanges réfractaires pulvérulents mis en oeuvre à l'état presque sec en les damant à l'endroit qu'ils doivent revêtir .

-- Mélanges réfractaires plastiques :

Ils permettent d'exécuter des réparations durables et très réfractaires. Ces produits sont Alumineux et Chromifères

-- Enduits : Ils sont utilisés comme protecteurs des surfaces réfractaires soumises à des conditions dures et agressives .

-- Mélanges projectables :

De même composition que les plastiques, les ciments de joints et des bétons réfractaires, ces mélanges sont projetés au moyen de pistolets à air comprimé.

III.5 : Les matériaux Isolants :

Ces matériaux isolants en face froide des fours ont pour but d'assurer l'isolation thermique donc de réduire les déperditions thermiques . Ils présentent une structure cellulaire , poreuse ou fibreuse .

On distingue les produits calorifuges utilisables jusqu'à 150°C et les produits i s o l a n t s utilisables entre 100°C et 1000°C .

Quelques matériaux isolants avec certaines de leurs caractéristiques sont représentés dans les tableaux se

trouvant en annexe .

III.6: Les produits réfractaires isolants :

Les produits réfractaires isolants doivent répondre à la définition des produits réfractaires c'est à dire de posséder une résistance pyroscopique supérieure à 1500°C et doivent avoir une faible conductivité thermique pour être isolants .

Ce type de produits est réalisé à partir des matières premières de l'industrie des réfractaires : Silice, Argile, Sillimanite, Alumine, Magnésie etc... . Pratiquement les produits à base d'argile et d'alumine sont les plus employés.

Les réfractaires isolants peuvent être subdivisés en quatre grands groupes :

a) Les réfractaires isolants façonnés (briques, pièces de formes ...):

On en trouve des briques argileuses, des briques très alumineuses, des briques de silice et de magnésie .

b) Les bétons réfractaires isolants rigides qui sont fabriqués avec du ciment alumineux ou super alumineux .

c) Les réfractaires isolants fibreux qui méritent une mention particulière car ils possèdent une conductivité thermique de 20 à 40 % plus faible que celle d'autres réfractaires isolants et une densité cinq à six fois plus petite .

La plus grande partie des réfractaires fibreux céramiques est constituée de mélanges de silice et d'alumine

fondus au four à arc électrique .

d) Les bétons réfractaires isolants fibreux et les produits fibreux composites .

Des tables en annexe représentent certains matériaux réfractaires, réfractaires isolants avec leurs caractéristiques .

COUPE TRANSVERSALE DU FOUR

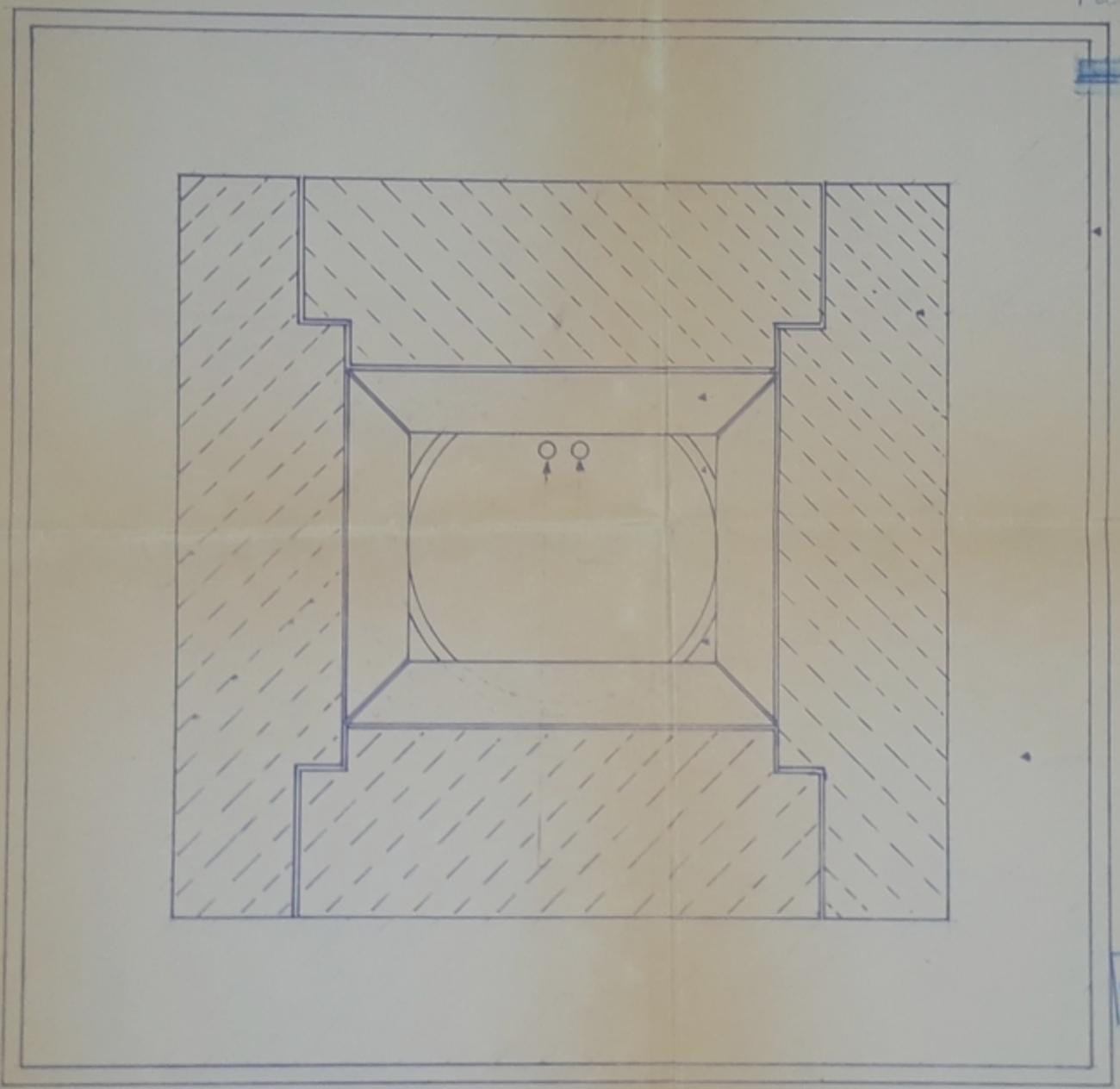
PL 02088
Après p 53

ECH: 1/2

المركز الوطني للتوثيق
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

المركز الوطني للتوثيق
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

المركز الوطني للتوثيق
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique



- CARCASSE METALIQUE
- BRIQUE REFRACTAIRE LEGERE
- BRIQUE REFRACTAIRE
- CHAMBRE DE CHAUFFE
- THERMOCOUPLE
- RESISTANCE 1212mm de P
- LAINE DE VERRE DE 7cm D'EPaisseur
- CANNE PYROMETRIQUE

المركز الوطني للتوثيق
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

54,5 cm

المركز الوطني للتوثيق
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE IV

REGULATION DES FOURS

IV.1 : Introduction :

Le but visé par un traitement thermique donné dépend en grande partie de la précision de la température . L'uniformité de la température dépend de la répartition et de la nature des résistances , du brassage de l'atmosphère et de la régulation .

Toutefois c'est la régulation qui permet l'ajustement fin et la précision de la température .

Entre la valeur enregistrée de la température et celle existant réellement dans le four, il existe des fluctuations qui dans certains cas peuvent être importantes . On appellera régulateur le système qui a pour but de faire varier l'entrée de l'organe régulé (four) de telle manière que le signal d'erreur soit le plus petit possible .

Un système de régulation comprend essentiellement :

-- Un détecteur de température qui mesure la température du four (ou des résistances) et la transforme en une grandeur électrique équivalente .

C'est un dispositif comprenant généralement un thermocouple ou une canne pyrométrique et un galvanomètre . C'est le galvanomètre qui permet l'affichage de la température puisque la force électromotrice donc l'intensité du courant qui se manifeste est une fonction de la différence de température entre les soudures chaude et froide du thermocouple .

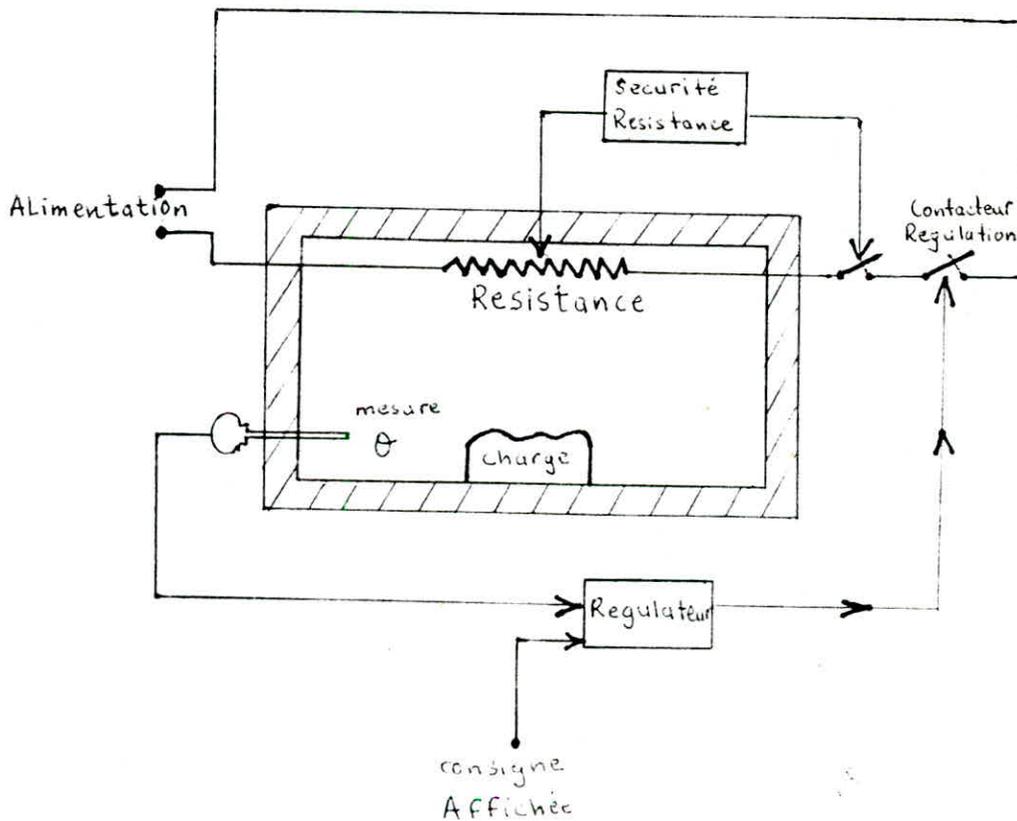
-- Un dispositif de comparaison entre la température mesurée et la température de consigne :

Son rôle est d'évaluer l'écart ϵ entre la température mesurée et la température référentielle .

-- Un système de commande et de variation de puissance :

Pour annuler le signal d'écart ϵ et d'avoir une température mesurée égale à la température de référence, plusieurs dispositifs sont utilisés pour faire varier la puissance à mesurer que la température dans le four tende à atteindre la température voulue .

On peut utiliser un rhéostat faisant varier la tension , une inductance ou un transformateur .



SCHEMA DE REGULATION CLASSIQUE.

IV.2 : Différents types de régulateurs :

La conception des régulateurs oblige à accepter une certaine amplitude de variation de la température à régler; cette amplitude est généralement comprise entre $(+/-) 5^{\circ}\text{C}$ et $(+/-) 10^{\circ}\text{C}$.

Plusieurs types de régulateurs sont utilisés et leur amélioration vise toujours une meilleure précision :

IV.2.1: Régulateurs proportionnels (P):

Les régulateurs P sont des éléments à action proportionnelle dont la grandeur d'entrée est l'écart de régulation et la grandeur de sortie la valeur référentielle

Leur défaut est de ne pas pouvoir éliminer complètement les écarts de régulation .

IV.2.2: Régulateurs intégrateurs (I) :

Leur action est intégrale et leur fonctionnement est lent .

IV.2.3: Régulateurs proportionnels Intégrateurs (P.I) :

C'est un régulateur pouvant être réalisé par la mise en parallèle d'un régulateur P et d'un régulateur I. Il réunit donc les avantages des deux types de régulateurs ,à savoir : pas d'erreur permanente et temps de réponse faible .

IV.2.4: Régulateur Proportionnel Dérivateur (P.D):

Son schéma électrique est identique au P.I sauf que les éléments changent .L'erreur qu'il induit est faible .

IV.2.5: Régulateurs proportionnels intégrateurs dérivateurs

(P.I.D):

Les avantages qu'ils offrent sont :

- la modulation continue de la puissance
- la précision de la température
- le temps de réponse réduit

Ils sont :

- **Proportionnels** : Car au voisinage de la température de consigne θ_c , la puissance absorbée croît proportionnellement à l'écart ξ .
- **Intégrales** : C'est une action qui permet de compenser l'écart de température .
- **Différentiels ou dérivateurs** : Car avec des régulations purement proportionnelles il peut se produire des oscillations importantes . L'action différentielle sert à limiter ses oscillations .

IV.2.6 : La régulation "TOUT ou RIEN " :

C'est la régulation utilisée pour la commande de notre four. Voir Chapitre V .

CHAPITRE V

CALCUL ET CONCEPTION

DU FOUR

V.1 :Introduction :

Pour effectuer un traitement thermique, le four doit être en mesure d'élever la température de la charge à une valeur prédéterminée et de l'y maintenir pendant un temps donné.

Pour ce faire, les matériaux et les équipements constituant le four doivent être étudiés en conséquence .

Les traitements thermiques utilisés dans notre four sont destinés aux aciers ordinaires ou faiblement alliés, aux fontes et autres alliages non ferreux, il faut donc prévoir une température d'utilisation qui permet de couvrir toute la gamme de traitements de ces matériaux .

Une bonne étude et disposition ainsi qu'un calcul rigoureux des résistances électriques, des matériaux réfractaires, des isolants, des thermocouples, du régulateur et de tous les autres éléments utilisés nous permettront d'atteindre ce but .

Le four à résistances est un équipement à chauffage indirect ou le corps de chauffe (résistances) reçoit une énergie électrique qu'il transforme en énergie calorifique P Cette énergie est ensuite transmise à la substance à chauffer et aux parois du four .

On doit donc analyser les points suivants :

- Production de la chaleur .
- Transmission de la chaleur .
- Utilisation de la chaleur comme :

* L'absorption par la substance à traiter

* Les pertes thermiques et rendement du four .

V.2 : Constitution du four :

Notre four comprend essentiellement :

- Une chambre de chauffe recevant la charge, celle-ci étant constituée d'un matériau réfractaire : " La Silice " dont la température de fusion est de 1600°C .
- Des matériaux réfractaires placés c^ontre cette chambre : les matériaux réfractaires utilisés sont aussi des isolants. Ce mur est donc constitué de briques réfractaires isolantes à base de Silice et d'Alumine .
- Des matériaux isolants sont ensuite placés contre ces réfractaires pour assurer le calorifuge du four .
- Une carcasse métallique assurant la rigidité du four .
- Des résistances électriques enroulées autour de la chambre de chauffe ainsi que leur dispositif d'alimentation
- Un thermocouple permettant de nous transmettre la température dans le four et une canne pyrométrique permettant d'établir le contact grâce à une cuve de mercure
- Un système de régulation de la température .
- Une porte donnant accès à la chambre de chauffe pour y déposer les charges ou les défourner .

Dans le four à résistances, la transmission de chaleur se fait selon les lois rappelées dans le chapitre introductif c'est à dire par conduction, convection et rayonnement .

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

V.3 : Calcul de la puissance du four :

L'énergie émise par le 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 .

La puissance à installer dans le four électrique discontinu est :

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

W : Puissance à installer en kw .

C₁ : Chaleur nécessaire à l'élevation de la température de la charge en Kwh .

C₂ : Chaleur accumulée dans les parois du four .

a : Coefficient tenant compte de la valeur moyenne des déperditions pendant la montée en température ;

"a" est généralement compris entre 0.6 et 0.8 .

D : Déperditions thermiques en Kw .

t : Durée de la montée en température .

Calcul de la chaleur C₁ absorbée par la charge :

La chambre de chauffe de notre four est constituée par un cylindre en Silice dont le volume est d'environ 7500 cm³ capable de supporter une charge de 3 Kg .

Supposons que la charge à traiter est de l'acier ordinaire vu que c'est le matériau le plus employé et que sa chaleur spécifique massique est élevée .

La chaleur accumulée par la charge est donnée par :

$$C_1 = m \int_{\theta_a}^{\theta_{max}} C_p \cdot d\theta$$

m : Masse de la charge = 3Kg .

C_p : Chaleur massique de l'acier variant en fonction de la température ou donnée directement par des tableaux (voir annexe).

$$\int_{\theta_a}^{\theta_{max}} C_p \cdot d\theta = \int_{\theta_a}^{\theta_{max}} (a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3) \cdot d\theta$$

$$a = 8567.10 \quad \text{Kcal / Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$b = 13.10 \quad \text{Kcal/Kg}$$

$$c = - 37.10 \quad \text{Kcal/Kg}$$

$$d = - 11,53.10 \quad \text{Kcal/Kg}$$

$$\int_{\theta_a}^{\theta_{max}} C_p = a(\theta_{max} - \theta_a) + b/2(\theta_{max}^2 - \theta_a^2) + c/3(\theta_{max}^3 - \theta_a^3) + d/4(\theta_{max}^4 - \theta_a^4)$$

$$\theta_{max} = 1100^\circ\text{C}$$

$$\theta_a = 20^\circ\text{C}$$

$$\int_{\theta_a}^{\theta_{max}} C_p = 150 \text{ Kcal/Kg} = 630 \text{ Kj/Kg}$$

$$\text{Ainsi : } C_1 = m \int_{\theta_a}^{\theta_{max}} C_p \cdot d\theta = 3 \times 630 \text{ Kj}$$

$$C_1 = 1890 \text{ Kj}$$

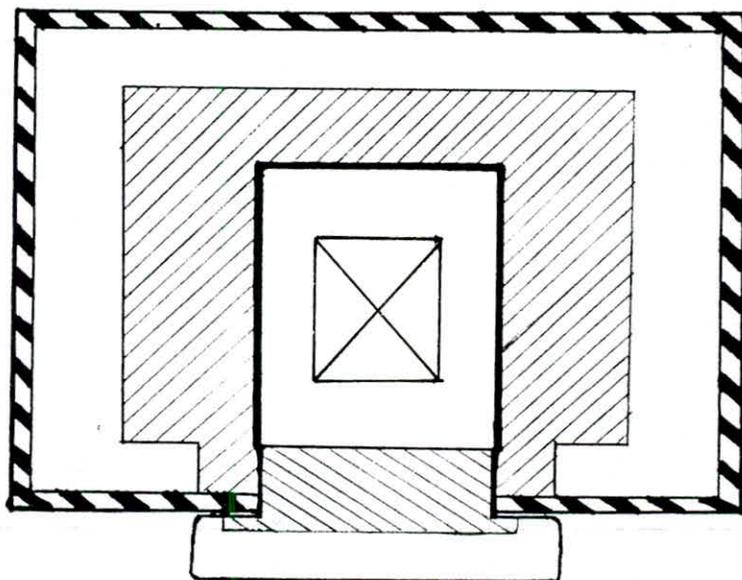
$$C_1 = 0,525 \text{ Kw}$$

V.4 : Calcul des déperditions thermiques :

La chaleur C_2 représente l'ensemble des chaleurs accumulées dans le creuset, dans les briques réfractaires, les matériaux isolants et dans la carcasse métallique externe.

Pour le calcul de chacune d'elles, il faut d'abord évaluer le flux thermique \mathcal{S} à travers les parois du four ainsi que les températures au niveau de chaque paroi .

Le schéma approximatif suivant représente les différentes parois du four, leurs dimensions et leurs matières de constitution :



-  : Chambre de chauffe en Silice .
-  : Briques réfractaires légères .
-  : Calorifuge (fibre et laine de verre)
-  : Carcasse métallique .

e_i : Représente l'épaisseur de chaque paroi .

λ_i : Représente la conductivité thermique .

α_1 : Coefficient de convection à l'intérieur .

α_2 : Coefficient de convection à l'extérieur .

La transmission de chaleur par conduction à travers les parois du four donne un flux \mathcal{Q} égal à :

$$\mathcal{Q} = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^3 \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$\mathcal{Q} = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Avec :

e_1 = épaisseur des briques = 115 mm

λ_1 = conductivité thermique des briques = $0,15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

e_2 = épaisseur de la laine de verre = 70 mm

λ_2 = conductivité thermique de la laine de verre = $0,056 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

e_3 = épaisseur de la carcasse métallique = 1 mm

λ_3 = conductivité thermique de la carcasse = $46 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

α_1 et α_2 sont calculés (d'après le chapitre introductif des transferts de chaleur) comme suit :

$$\alpha_1 = A_{moy} (\theta_{int} - \theta_{ext})^{0,25}$$

$$A_{\text{moy}} = \frac{1,3 + 1,8 + 2,5}{3} = 1,8$$

$$\alpha_1 = 1,8 (1100 - 20)^{0,25} = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

α_2 représentant le coefficient de convection à l'extérieur des parois est égal à $100 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Ainsi :

$$\mathcal{G} = \frac{(1100 - 20)}{\frac{1}{10} + \frac{0,115}{0,15} + \frac{0,070}{0,056} + \frac{0,001}{46} + \frac{1}{100}}$$

$$= \frac{(1100 - 20)}{2,127} = 508 \text{ W/m}^2$$

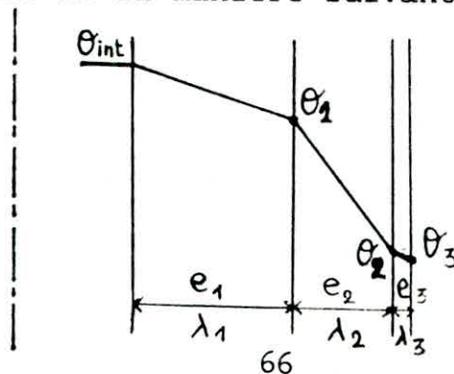
$$\mathcal{G} = 508 \text{ W/m}^2$$

La porte du four étant fabriquée de la même manière que les autres parois du four et est bien étanche . Les pertes thermiques à travers elle sont donc faibles comme les autres parois .

Les déperditions thermiques globales de l'ensemble du four sont donc :

$$D = 508 \text{ W/m}^2$$

L'évolution de la température à travers chaque paroi du four se fait de la manière suivante :



θ_{int} = température interne = 1100°C

θ_{ext} = température ambiante = 20°C

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \theta_{int} - \mathcal{J} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} \right) \\ &= 1100 - 508 \left(\frac{1}{100} + \frac{0,115}{0,15} \right) \\ &= 1100 - 394,5 = \boxed{705,5 \text{ °C}}\end{aligned}$$

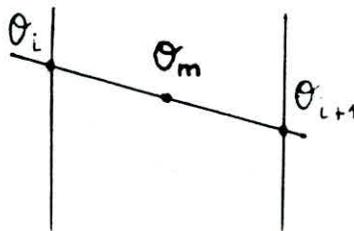
$$\begin{aligned}\theta_2 &= \theta_1 - \mathcal{J} \left(\frac{e_2}{\lambda_2} \right) \\ &= 705,5 - 508 \left(\frac{0,070}{0,056} \right) \\ &= 705,5 - 635\end{aligned}$$

$$\boxed{\theta_2 = 70,5 \text{ °C}}$$

$$\begin{aligned}\theta_3 &= \theta_2 - \mathcal{J} \left(\frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \\ &= 70,5 - 508 \left(\frac{1}{46} + \frac{1}{10} \right)\end{aligned}$$

$$\boxed{\theta_3 = 20 \text{ °C}}$$

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



$$\text{Ainsi : } \theta_{m1} = \frac{1100 + 705,5}{2} = 902,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{m2} = \frac{705,5 + 70,5}{2} = 388 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{m3} = \frac{70,5 + 20}{2} = 45,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nous avons donc évaluer les déperditions thermiques du four, les différentes températures de chaque paroi ainsi que la température moyenne du milieu des parois .

Ces températures moyennes nous servirons pour le calcul des chaleurs accumulées dans les matières constituant le four .

L'accumulation de chaleur se fait au niveau du creuset en Silice, du mur des briques réfractaires, de la matière isolante et de la carcasse métallique .

Les masses, les chaleurs spécifiques et les températures moyennes de chacun d'eux est donné par :

	masse(Kg)	C _p (Kj/Kg°C)	θ _{moy} (°C)
Creuset	2	1,1	1100
Brique réfractaire	20	0,95	902,75
Laine de verre	7	0,65	388
Carcasse	10	0,45	45,25

$$C_2 = Q_{cr} + Q_{br} + Q_{L.v} + Q_{met}$$

--Chaleur accumulée dans le creuset :

$$\begin{aligned} Q_{cr} &= m_{cr} \cdot C_{p_{cr}} \cdot (\theta_{cr} - \theta_{initiale}) \\ &= 2 \times 1,1 \times 1080 = 2376 \text{ Kj} \end{aligned}$$

--Chaleur accumulée dans les briques réfractaires :

$$\begin{aligned} Q_{br} &= m_{br} C_{p_{br}} (\theta_{br} - \theta_{initiale}) \\ &= 20 \times 0,95 \times (902,75 - 20) \\ &= 16772,25 \text{ Kj} \end{aligned}$$

--Chaleur accumulée dans le calorifuge

$$\begin{aligned} Q_{L.v} &= m_{L.v} \cdot C_{p_{L.v}} \cdot (\theta_{L.v} - \theta_{initiale}) \\ &= 7 \times 0,65 \times (388 - 20) \\ &= 1674,5 \text{ Kj} \end{aligned}$$

--Chaleur accumulée dans la carcasse métallique

$$\begin{aligned} Q_{mét} &= m_{mét} \cdot C_{p_{mét}} \cdot (\theta_{mét} - \theta_{initiale}) \\ &= 10 \times 0,45 \times (45,25 - 20) \\ &= 113,6 \text{ Kj} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 &= 2376 + 16772,25 + 1674,5 + 113,6 \\ &= 20936,3 \text{ Kj} \end{aligned}$$

$$C_2 = 5,81 \text{ Kw}$$

La puissance à installer dans le four est donc :

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

$$t = 1 \text{ heure} \quad \text{et} \quad a = 0,7$$

$$W = \frac{0,525 + 5,81}{1} + 0,7 \times 0,508$$

$$W = 6,69 \text{ Kw}$$

Pour une meilleure durée de vie de la résistance et un bon rendement du four, la résistance choisie est en KANTHAL A-1 (Alliage Ni-Cr) d'une puissance de 8 Kw capable de fournir une température d'environ 1250°C .

Rendement pratique du four

Le rendement du four permet d'évaluer ses performances thermiques et économiques .

Le rendement pratique η est égal au produit du rendement électrique η_1 par le rendement thermique η_2 .

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2$$

$$\eta_1 = \frac{Q_1}{Q} \quad \text{en général égal à 95\%}$$

$$\eta_2 = \frac{Q_2}{Q_1}$$

Q_1 = Énergie électrique transformée en énergie thermique

Q = Energie électrique fournie au four

Q_2 = Energie emmagasinée dans la charge

$Q_1 - Q_2$ = Represente les pertes thermiques

En général le rendement pratique des fours à résistances est compris entre 50 et 75 % .

V.5 : Construction du four et choix des équipements et matériaux qui le constituent

Pour remplir les conditions citées préalablement, à savoir :

- L'atteinte d'une température maximale de 1100°C pour pouvoir effectuer les traitements thermiques principaux .
- Reduire le plus possible les déperditions thermiques .
- Améliorer le transfert thermique entre la charge et le corps de chauffe .
- Augmenter la durée de vie du four .
- Améliorer le rendement .

On a utilisé une chambre de chauffe cylindrique en Silice réfractaire permettant un rayonnement homogène de la chaleur dont les dimensions sont :

Hauteur $h = 400$ mm

Epaisseur $e = 7$ mm

Diamètre intérieur $d_i = 180$ mm

La résistance enroulée autour de la chambre est fixée par du béton réfractaire pour éviter l'attraction des spires est constituée par un alliage Ni-Cr du type KANTHAL A-1 dont la température maximale d'utilisation est de 1250 °C (Voir tableau en annexe). Elle est constituée par des spires jointives dont le diamètre du fil est de 2 mm . La longueur de cette résistance est de 4500 mm .

Un mûr constitué par des briques réfractaires isolantes légères à faible coefficient de conductivité thermique, d'une largeur de 115 mm est bâti autour de la chambre de chauffe pour permettre une réflexion de la chaleur vers l'intérieur de celle-ci .

La paroi isolante assurant le bon calorifuge est essentiellement constituée de laine et de fibres de verre reconnues pour leurs très faibles coefficients de conductivité thermique (Voir tableau en annexe). Elle est étalée sur une largeur de 70 mm autour du bâti .

Le tout a été englobé dans une carcasse métallique en acier d'une épaisseur de 1 mm ayant la forme d'un prallépipède donnant au four les dimensions suivantes :

Largeur = 545 mm

Longueur = 625 mm

Hauteur = 525 mm

Sur cette carcasse métallique, ont été conçus un boitier de 320 x 180 x 180 mm renfermant le système de régulation complet ainsi que les trous permettant l'introduction du thermocouple et de la canne pyrométrique .

Sur la paroi avant du four, a été aménagée une ouverture rectangulaire de 170 x 210 mm pour l'emplacement de porte.

La porte est faite extérieurement par une paroi métallique identique à celle utilisée pour la carcasse du four .Elle a été usinée et bourrée de laine de verre isolante , devancée par une brique réfractaire isolante servant de fermeture étanche pour empêcher tout échappement de chaleur .

Elle est fixée par des boulons et peut glisser sur une tige réservée à cet effet . Elle est pourvue de manettes facilitant sa fermeture ou son ouverture .

l'ensemble du système de régulation constitué par des cuves de mercure établissant le contact, des boutons de fonctionnement (arrêt, marche et choix de la température) du four reliés par des fils ainsi que le lecteur de température et d'autres accessoires est fixé sur la paroi latérale droite du four et enveloppée par une petite carcasse métallique .

Le thermocouple utilisé est en Platine/Platine - Rhodié à 10% compatible avec l'appareil de lecture de température gradué jusqu'à 1200°C .

La canne pyrométrique est faite d'une tige en pyros dont la dilatation régulière et réversible est proportionnelle à la température permet d'établir le contact pour la mise en marche ou l'arrêt de la résistance au moment où la température affichée est atteinte .

V.6 : Régulation du four

La régulation adoptée à notre four se fait en " tout ou rien " du type classique .

On a utilisé un thermocouple en Platine/Platine-Rhodié relié à un lecteur de température de même type et compatible avec ce thermocouple .

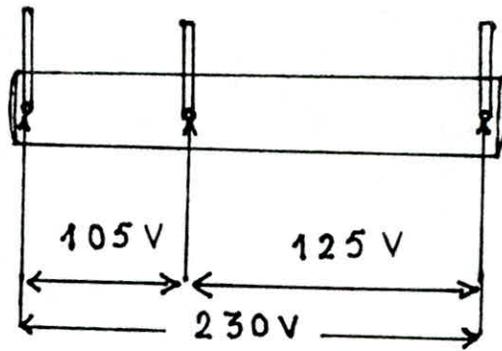
Le lecteur de température gradué de 0 à 1200°C est constitué essentiellement d'un galvanomètre permettant de devier l'aiguille dans le sens des températures croissantes pendant le chauffage et décroissantes pendant le refroidissement . Cette déviation de l'aiguille est

proportionnelle à la force électromotrice donc au courant résultant de la différence de température entre la soudure chaude du thermocouple (à l'intérieur du four) et la soudure froide (à l'extérieur) .

Une canne pyrométrique située entre les résistances et la charge constituée intérieurement par une tige en pyros se dilatant linéairement en fonction de la température. En fonction de l'écart entre la consigne qui lui est imposée et la mesure de température provenant du thermocouple, cette canne pyrométrique jouant le rôle du régulateur commande un contacteur interrompant ou rétablissant l'alimentation électrique des éléments chauffants .

Le contacteur est une cuve à mercure formée de deux petits récipients reliés entre eux par une tige creuse permettant la circulation du mercure . Un filament chauffant situé dans l'un des deux récipients pousse le mercure à circuler dans un premier sens pour établir le contact et rétablissant l'alimentation électrique ou dans l'autre sens pour l'interrompre quand la valeur de la température de consigne est atteinte .

Une inductance est placée de façon à varier la tension pour ne pas trop solliciter les résistances . La répartition de la tension le long de cette inductance est indiquée dans la figure suivante :



Les éléments chauffants se trouvent en série avec la cuve à mercure et la bobine (inductance) se trouvent donc alimentés à la tension avec la puissance dissipée égale à la puissance installée c'est à dire qu'ils sont alimentés à la tension maximale jusqu'à l'approche de la température de consigne . Pendant la montée en température, la puissance installée est donc appelée en permanence .

La mise en marche ou l'arrêt du four ainsi que le choix de la température de consigne se font par deux boutons réservés à cet effet . Ces deux boutons sont surmontés respectivement de deux lampes témoins .

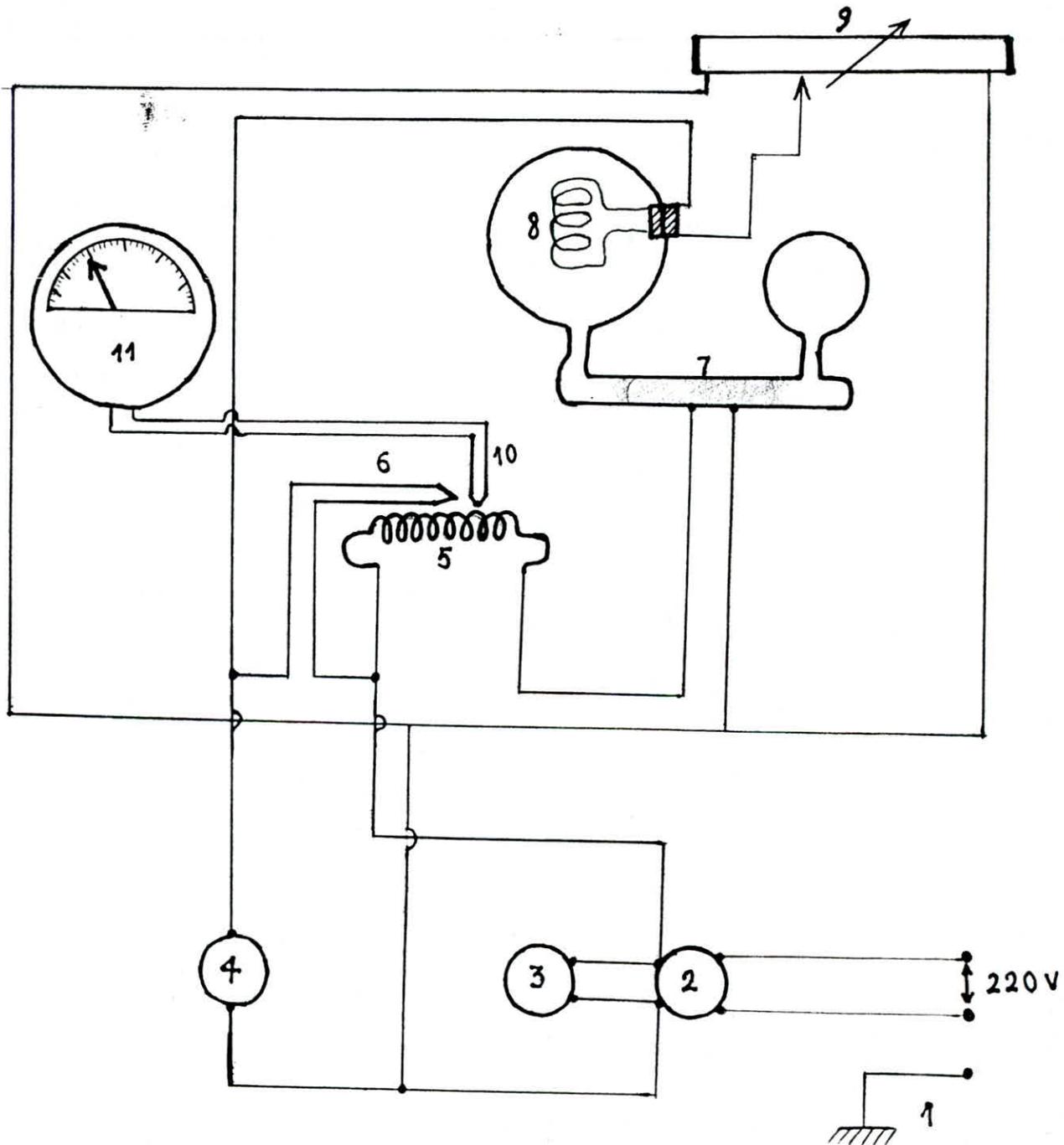
La lampe rouge allumée indique que le four est en marche . La lampe jaune est allumée dans le cas où les éléments chauffants sont alimentés et éteinte pour signaler que la température de consigne est atteinte et que la résistance n'est pas allumée .

Au moment où la limite inférieure de la température est atteinte, le courant se rétablit dans les résistances grâce au contacteur et la lampe témoin jaune se rallume .

Ainsi, au cours de la régulation la lampe jaune s'allume et s'éteint constamment; La température de la résistance évolue donc en dent de scie avec une période

"T" et une amplitude $\pm \Delta \theta$ autour de la température moyenne θ_{moy} .

Dans ce qui suit nous donnons un schéma électrique globale du système de commande et de régulation de notre four .



N°	Désignations
I	Prise de terre
2	Interrupteur
3	Témoin rouge
4	Témoin jaune
5	Résistance du four
6	Pyromètre
7	Cuve de mercure
8	Filament chauffant
9	Inductance variable
10	Thermocouple
11	Lecteur de température

I N T E R P R E T A T I O N

L'évaluation de l'intérêt d'un projet de réalisation d'un équipement électrothermique en général et d'un four en particulier doit comprendre une analyse de ses aspects économiques, ses capacités de production et ses caractéristiques techniques .

A part les considérations de coût et de disponibilité, un four doit posséder des caractéristiques techniques qui justifient son utilisation :

- facilité de mesure et de régulation
- aptitude à une localisation précise de l'effet thermique
- possibilité d'obtenir des niveaux de températures très élevés
- densité de puissance élevée
- facilité de répartition et de reproductibilité
- contrôle aisé de l'atmosphère de travail
- rendements énergétique et thermique très élevés
- limitation de pollution
- qualité élevée des produits élaborés

Bien que les fours à résistances électriques soient des outils très robustes, il est indispensable de prendre un minimum de précautions lors de leur exploitation .

Lorsque le problème se pose en terme de choix énergétique entre l'électricité et les combustibles, il est recommandé de rechercher les techniques électrothermiques les plus efficaces et de tirer le meilleur parti des vastes possibilités du type de chauffage .

En général, les fours électriques sont traités de manquer de nervosité par rapport aux fours à combustibles . Ce reproche est la plus part du temps injustifié car de nombreuses opérations thermiques nécessitent l'emploi du four électrique qui présente des avantages tant sur le point technique qu'économique et social .

Avantages techniques :

- Les résistances actuelles couvrent un domaine de température très vaste, et la science des matériaux continue sans cesse à l'amélioration de leurs caractéristiques .
- Le mode de transmission de la chaleur est facile à adapter aux exigences du chauffage du produit .
- Les systèmes de régulation assurent une très grande précision de la température et la bonne répartition des résistances dans le four permet son excellente homogénéité .
- Les fours à résistances électrique peuvent fonctionner avec atmosphères très diverses, air, vide, atmosphères contrôlées, réductrices ou oxydantes .
- L'automatisation est facile à réaliser .
- Les résistances peuvent convenir et être placées dans les fours aux formes les plus diverses .
- Les qualités thermiques et la propreté favorisent l'obtention des pièces de qualités élevées .
- Le fonctionnement du four est très simple et sûr .

Avantages économiques :

- Les investissements requis par les fours à résistances sont vite compensés .

--Leur rendement est élevé et chute moins vite que les fours à combustibles .

--La mesure continue des quatités d'électricité consommées facilite le contrôle de gestion .

--Le fonctionnement automatique réduit les frais de main-d'oeuvre .

Avantages sociaux :

--L'absence de fumées et de bruit améliore les conditions de travail et préserve la propreté .

-- La facilité de conduite et d'automatisation supprime les travaux pénibles .

-----°-----°-----°-----°-----°-----°-----°-----

Après concéption et réalisation de notre four, des essais d'évolution de la température et de régulation ont été effectuées nous permettant de les visualiser par des coubes qui mettent en valeur :

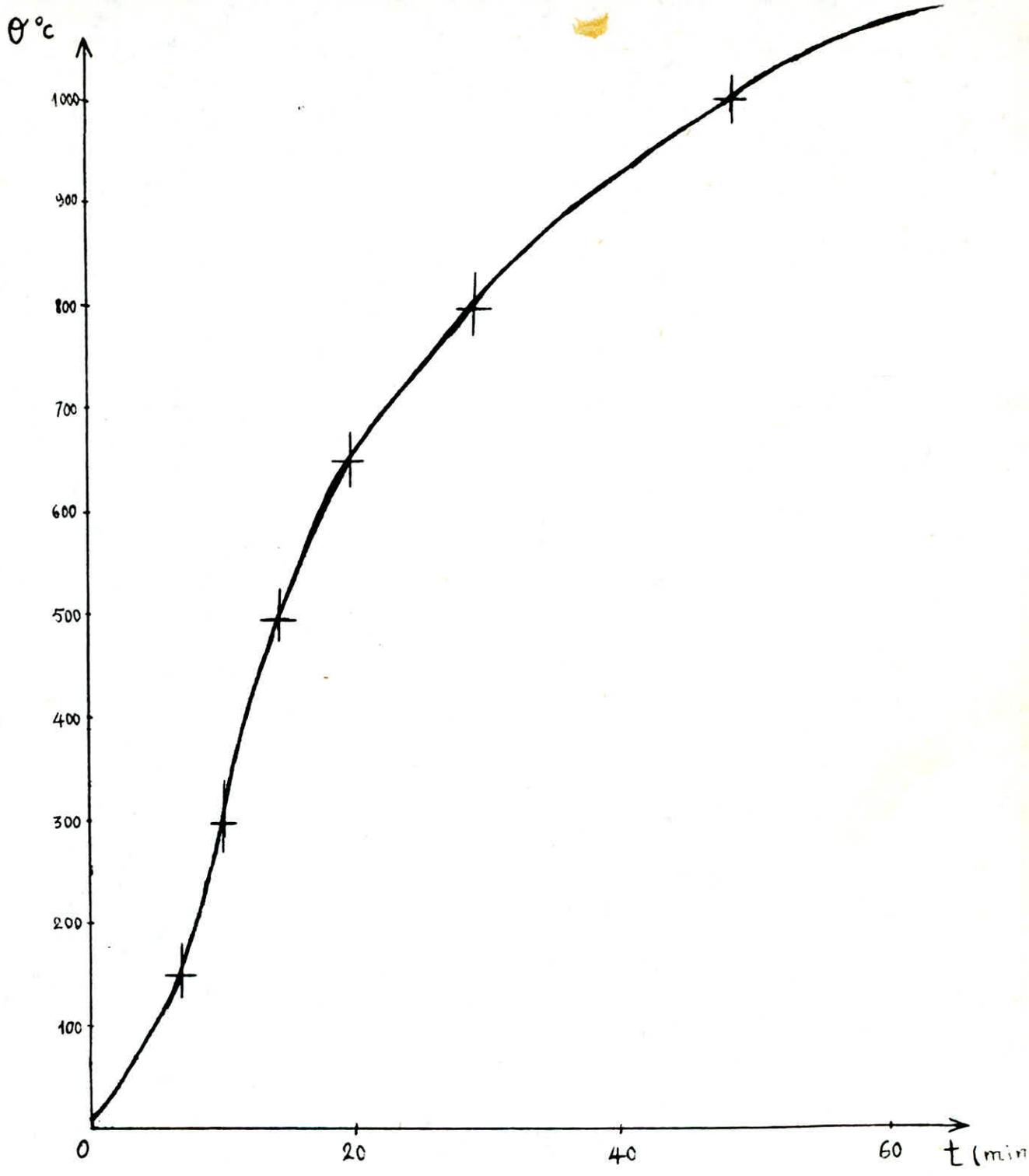
-- L'évolution de la température à pleine puissance de l'ambiance à la température maximale d'emploi :1100°C .

-- Le refroidissement du four de 900°C à 20°C , la porte étant fermée .

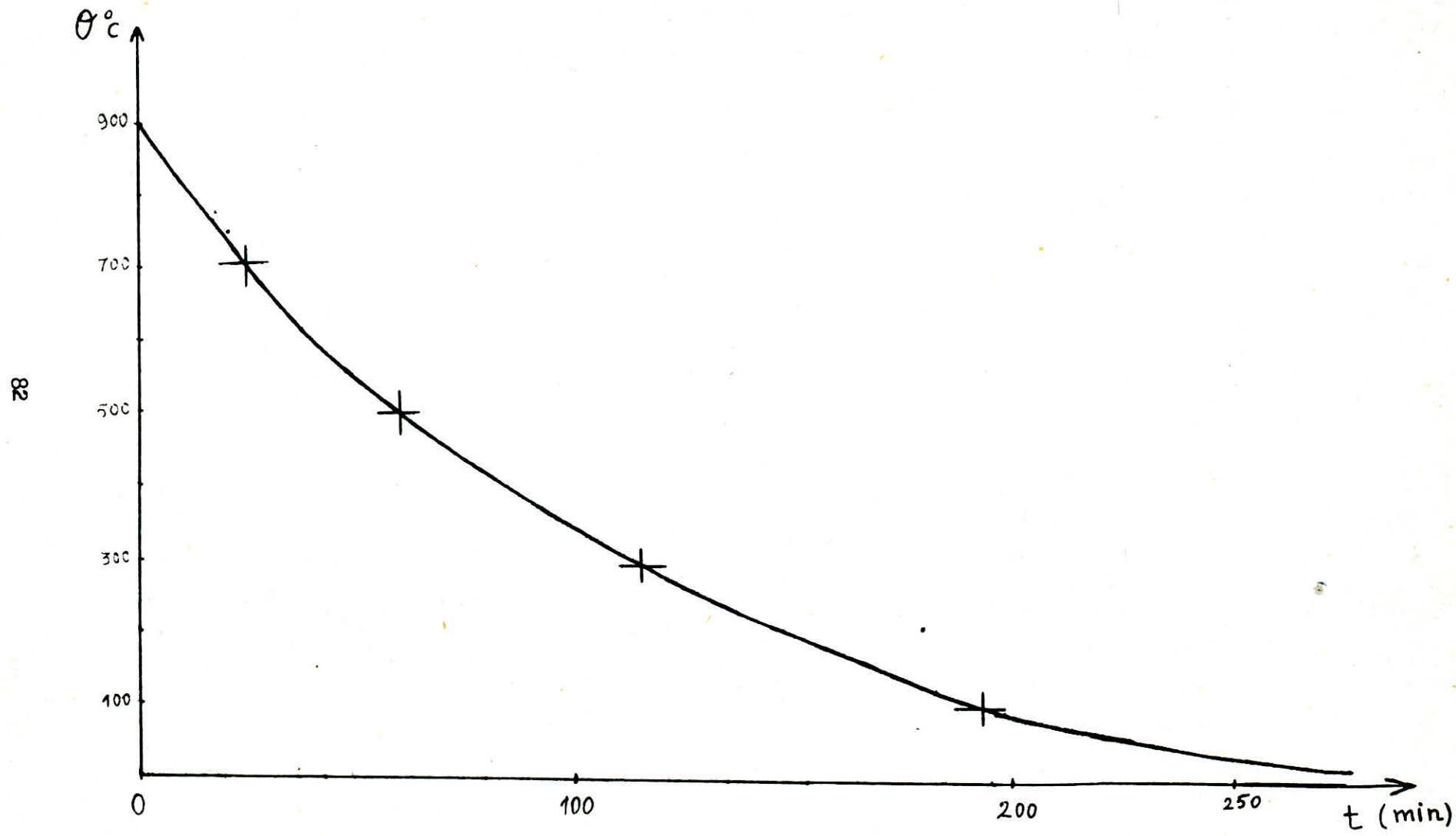
-- Le refroidissement du four de 1100°C à 20°C, la porte étant ouverte .

-- L'efficacité de la régulation utilisée pour une température consigne de 715°C .

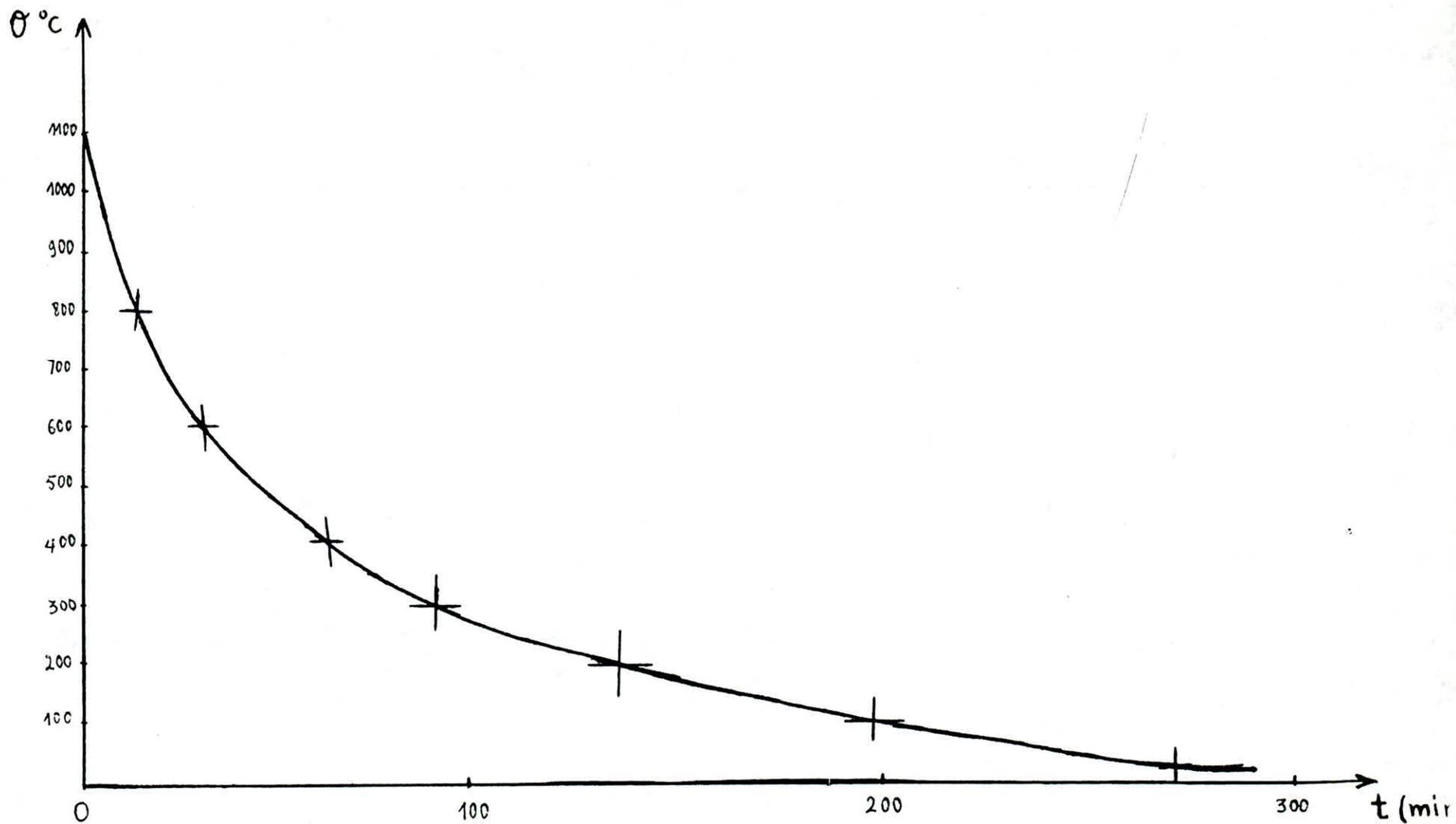
Les courbes sont illustrées dans les pages suivantes et sont suivies d'une interpretation .



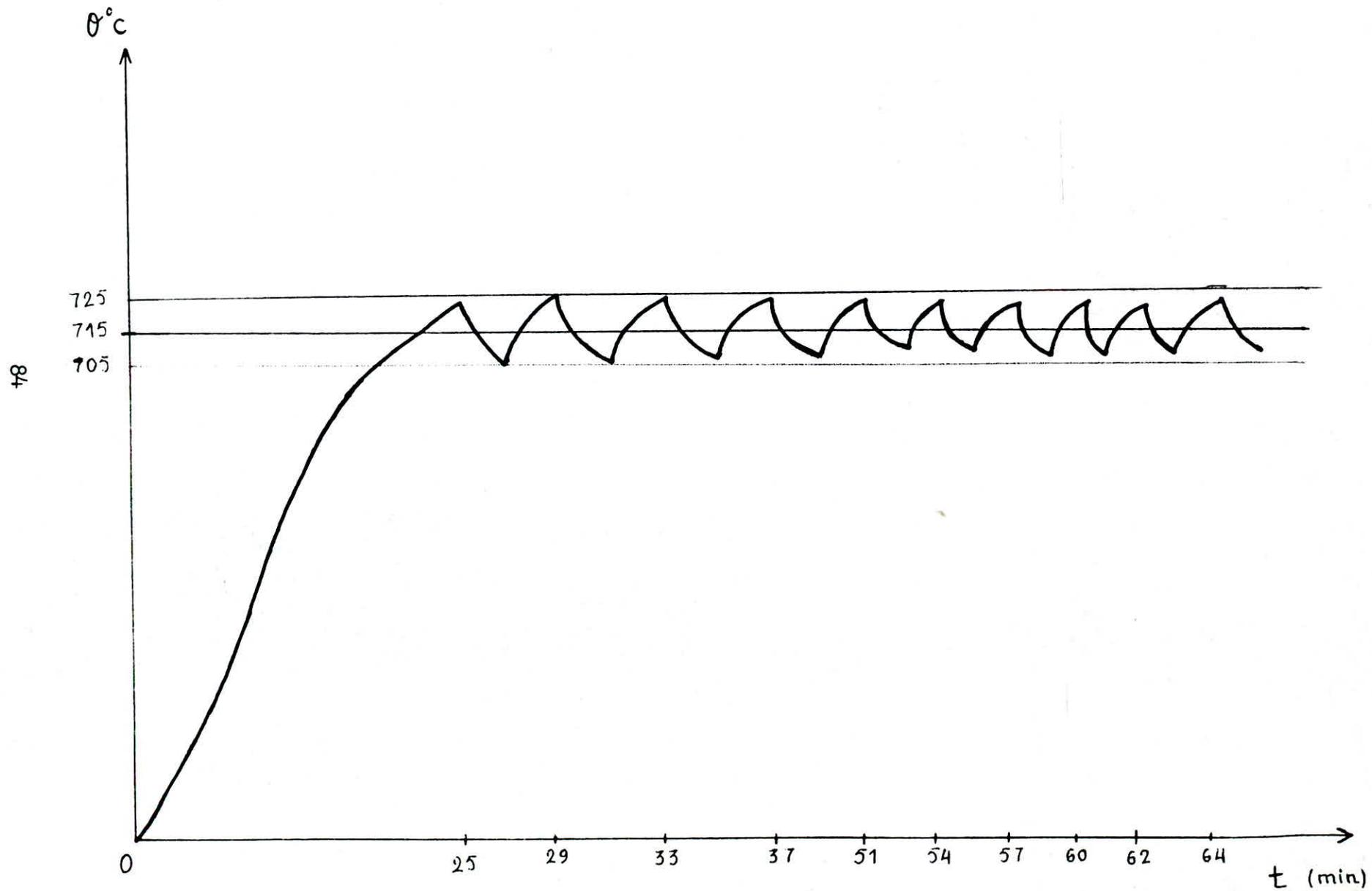
COURBE N° I : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS
PENDANT LE CHAUFFAGE DE 20°C A 1100°C .



COURBE N° 2 : REFROIDISSEMENT DE 900°C A 20°C : PORTE FERMEE.



COURBE N° 3 : REFROIDISSEMENT DE 1100°C A 20°C , PORTE OUVERTE .



COURBE N° 4 : REGULATION A 715°C

La courbe N°1 reproduisant l'évolution de la température en fonction du temps montre que le four passe de 20°C à 1100°C en 52 minutes .

La vitesse moyenne de chauffage est évaluée à environ 20,77°C/min .

On remarque que le temps de chauffage de 20°C à 700°C est de 18 min alors que de 700°C à 1100°C , il est de 35 min. La courbe change de concavité est sa pente s'atténue à partir de 700°C .

Ceci s'explique par le fait que les résistances sont alimentées à pleine puissance jusqu'à 700°C puis l'intensité du courant et par suite la puissance diminue peu à peu jusqu'à s'annuler au moment où la température requise est atteinte .

La vitesse de chauffage de 20°C à 700°C est :

$$V_1 = \frac{700 - 20}{18} = 37,8^\circ\text{C}/\text{min}$$

La vitesse de chauffage de 700°C à 1100°C est :

$$V_2 = \frac{1100 - 700}{35} = 11,4^\circ\text{C}/\text{min}$$

On constate d'après les courbes de refroidissement que le temps mis par le four pour se refroidir est nettement supérieur à celui de son chauffage pour la même température

Pour se refroidir à partir de 1100°C à 20°C , la porte étant ouverte (ceci augmente la vitesse de refroidissement vu l'augmentation des pertes thermiques à travers la

porte), le four met quatre Heures et demie .

Cette vitesse moyenne de refroidissement est évaluée à

$$V_r = \frac{1100 - 20}{253} = 4,27^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

Ces résultats sont importants et démontrent que la mise en oeuvre de dispositifs, matériaux et équipements possédant des caractéristiques mécaniques et thermiques adéquates ; leur calcul et leurs dispositions ont été rigoureusement établis de façon à minimiser les pertes thermiques , à avoir un bon calorifuge et à concevoir un dimensionnement satisfaisant .

La précision de la régulation agit sur l'uniformité de la température dans le temps . Une parfaite uniformité dans le temps se traduit sur un enregistreur par une droite , malheureusement l'inertie thermique des appareils utilisés fait qu'ils n'indiquent la température réelle qu'avec un certain retard ; on assiste à de légères fluctuations de la température de part et d'autre de la valeur choisie .

Il faut donc tolérer un certain dépassement périodique de la température de consigne de la résistance . En général la fourchette de tolérance est comprise entre (+/-) 5°C et (+/-) 10°C .

Dans notre cas , et comme l'indique la figure N°4 , la courbe oscille en dents de scie de part et d'autre de la valeur consignée de (+/-) 6°C . La régulation utilisée est donc apte à assurer le bon asservissement du four .

C O N C L U S I O N

Malgré l'insuffisance des moyens qui étaient à notre disposition, vu que les matériaux et équipements utilisés ont été récupérés au niveau de l'Ecole Nationale Polytechnique et de la fonderie de Rouiba, il a été possible de réaliser le four.

Cette tentative a été menée à terme et les résultats sont satisfaisants.

Les essais effectives sur le four et les courbes qui ont été trouvées reflètent son efficacité, démontrent ses bonnes performances mécaniques et thermiques et prouvent le parfait fonctionnement du système de régulation.

Ainsi notre four peut être utilisé à des fins du laboratoire pour des travaux de routine et de démonstration.

Nous recommandons aux utilisateurs de se confirmer aux caractéristiques citées préalablement et de le manipuler soigneusement.

Notre souhait serait la réalisation d'un four sous-vide ou à atmosphère contrôlée possédant des qualités et des performances mécaniques plus élevées. Il permettrait de réaliser des traitements thermiques difficiles à obtenir par d'autres méthodes, de traiter des métaux spéciaux et des pièces pour l'industrie de pointe.

A N N E X E

Caractéristiques d'une gamme de résistances à base d'alliages de fer, de nickel et de chrome (BG)

Composition	1	2	3	4	5	6	7	8
Caractéristiques	Ni80- Cr20	Ni70- Cr30	FeNi60- Cr15	FeNi45- Cr23	FeNi36 Cr18	FeNi32- Cr20	FeNi19- Cr25	FeNi10- Cr18
Densité	8,35	8,15	8,20	8,00	8,00	7,90	7,90	7,90
Point de fusion (°C)	1400	1400	1400	1400	1390	1390	1380	1380
Coefficient moyen de dilatation en $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ entre 0°C et:								
- 500°C	15,5	15,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,3	18,0
- 1000°C	17,5	17,5	17,5	17,8	18,0	18,0	18,5	
Chaleur spécifique à 0°C (Wh/kg.°C)	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Résistivité à 20°C (Ω.cm)	108	118	112,2	112	105	104	95	74
Coefficient moyen de température de la résistivité ($10^6/^{\circ}\text{C}$)	52	58	120	158	250	250	400	330
Température maximale d'utilisation (°C)	1200	1250	1100	1150	1050	1050	950	500

TABLEAU N°I

Caractéristiques d'une gamme de résistances fer-chrome-aluminium (BH)

Caractéristiques	Composition		
	Cr22Al5,5-Fe	Cr22-Al5,0-Fe	Cr22-Al4,5-Fe
Densité	7,1	7,15	7,25
Température maximale d'utilisation en régime permanent de l'élément (°C)	1375	1330	1280
Résistivité à 20°C (.cm)	145	139	135
Coefficient moyen de température de la résistivité ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	40	60	70
Point de fusion (°C)	1500°C environ		
Chaleur spécifique à 20°C (Wh/kg.°C)	0.13		

TABLEAU N° 2

Caractéristiques des résistances en platine et platine-rhodié (13)

Propriétés	Pt	Pt-Rh à 10%	Pt-Rh à 20%	Rh
Densité	21,5	20	18,75	12,48
Température de fusion(°C)	1769	1850	1884	1985
Résistivité à 0°C (.cm)	9,81	18,4	20,4	4,3
Température maximale d'emploi de la résistance (°C)	1400	1500	1600-1700	1850-1900
Coefficient de température de la résistivité entre 0°C et la température d'emploi ($10^{-3}/^{\circ}\text{C}$)	31,62	14,22	12,10	5,96
Densité de puissance maximale à la température de régime (W/cm^2)	2	2	2	2

TABLEAU N° 3

Caractéristiques des résistances en molybdène, tungstène et tantale (13)

Propriétés	Mo	W	Ta
Densité	9,6 - 10,28	19,32	16,65
Température de fusion (°C)	2610	3410	3000
Température de vaporisation (°C)	4800	5930	4100
Résistivité à 0°C (.cm)	5,15	5,5	12,4
Coefficient moyen de température de la résistivité entre 0°C et 2000°C ($10^{-3}/^{\circ}\text{C}$)	5,5	5,5	3
Température maximale d'emploi de la résistance (°C)	1500-1700	2200-2800	2400
Puissance surfacique usuelle (W/cm^2)	10-20	10-20	10-20

TABLEAU N° 4

Nature du fil	Température maximale admissible en °C pour différents diamètres ϕ du fil (ϕ en mm)			
	0,15 - 0,40	0,41 - 0,95	1,0 - 3,0	>3,0
KANTHAL A-1	-	-	1225 - 1350	1375
KANTHAL A	925 - 1050	1050 - 1175	1175 - 1300	1330
KANTHAL D-S-D	925 - 1025	1025 - 1100	1100 - 1200	1280

TABLEAU N° 5

Caractéristiques	CARBONE	GRAPHITE
Densité réelle	1,8	2,25
Résistivité ($\mu\Omega.cm$)	7500	900
Température d'ébullition (°C)	3600	
Température d'emploi (°C)	2200	{ 2600 SOUS vide 2800 sous Argon 3000 sous Hélium
Température de début d'oxydation (°C)	400	500

TABLEAU N° 6

Caractéristiques de quelques produits réfractaires courants

Réfractaire	Base	Température de fusion (°C)
Silice	SiO ₂	1700
Argile	2SiO ₂ .Al ₂ O ₃ .2H ₂ O	1700
Sillimanie	SiO ₂ .Al ₂ O ₃	1800
Alumine, bauxite	Al ₂ O ₃	2050
Fer chromé, chromite	FeO.Cr ₂ O ₃	2000
Carbone	C	3000
Carbone de silicium	SiC	2500
Chaux vive	CaO	2200-2570
Magnésie	MgO	2800
Dolomie	CO ₃ Ca.CO ₃ Mg	2300
Zircon	SiO ₂ Zr ₃	2000
Zircone	ZrO ₂	2400-2500

Caractéristiques moyennes de quelques isolants thermiques

Désignation du calorifuge	Conductivité à 0°C (W/m.°C)	Poids spécifique (kg/m ³)
Amiante	0,14	5,76
Carbonate de magnésium	0,056	250
Laine de laitier	0,03-0,06	120-250
Kieselguhr (briques cuites)	0,08	180-250
Béton cellulaire	0,06-0,2	260-900
Laine de verre	0,056	220
Liège (grains)	0,04	80-100
Liège aggloméré	0,06	250-300
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 immobile	0,02-0,035	1,3

Température en °C	Normes ASA C 96-1-1964 (circulaire 561) Température EIPT 48						Circulaire BNS qui annule et remplace la 561 Température EIPT 68					
	COUPLES :						COUPLES :					
	J	T	K	E	S	R	J	T	K	E	S	R
- 270								- 6,258	- 6,458	- 9,835		
- 260								- 6,232	- 6,441	- 9,797		
- 250								- 6,181	- 6,404	- 9,719		
- 240								- 6,105	- 6,344	- 9,604		
- 230								- 6,007	- 6,262	- 9,455		
- 220								- 5,889	- 6,158	- 9,274		
- 210								- 5,753	- 6,035	- 9,063		
- 200			- 5,75	- 8,71			- 8,096	- 5,603	- 5,891	- 8,824		
- 190	- 7,66	- 5,379	- 5,60	- 8,45			- 7,659	- 5,439	- 5,730	- 8,561		
- 180	- 7,40	- 5,205	- 5,43	- 8,17			- 7,402	- 5,261	- 5,550	- 8,273		
- 170	- 7,12	- 5,018	- 5,24	- 7,87			- 7,122	- 5,069	- 5,354	- 7,963		
- 160	- 6,82	- 4,817	- 5,03	- 7,55			- 6,821	- 4,865	- 5,141	- 7,631		
- 150	- 6,50	- 4,603	- 4,81	- 7,20			- 6,499	- 4,648	- 4,912	- 7,279		
- 140	- 6,16	- 4,377	- 4,58	- 6,83			- 6,159	- 4,419	- 4,669	- 6,907		
- 130	- 5,80	- 4,138	- 4,32	- 6,44			- 5,801	- 4,177	- 4,410	- 6,516		
- 120	- 5,42	- 3,887	- 4,06	- 6,04			- 5,426	- 3,923	- 4,138	- 6,107		
- 110	- 5,03	- 3,624	- 3,78	- 5,62			- 5,036	- 3,656	- 3,852	- 5,680		
- 100	- 4,63	- 3,349	- 3,49	- 5,18			- 4,632	- 3,378	- 3,553	- 5,237		
- 90	- 4,21	- 3,062	- 3,19	- 4,73			- 4,215	- 3,089	- 3,242	- 4,777		
- 80	- 3,78	- 2,764	- 2,87	- 4,26			- 3,785	- 2,788	- 2,920	- 4,301		
- 70	- 3,34	- 2,455	- 2,54	- 3,78			- 3,344	- 2,475	- 2,586	- 3,811		
- 60	- 2,89	- 2,135	- 2,21	- 3,28			- 2,892	- 2,152	- 2,243	- 3,306		
- 50	- 2,43	- 1,804	- 1,86	- 2,77			- 2,431	- 1,819	- 1,889	- 2,787		
- 40	- 1,96	- 1,463	- 1,50	- 2,24			- 1,960	- 1,475	- 1,527	- 2,254		
- 30	- 1,48	- 1,112	- 1,14	- 1,70			- 1,481	- 1,121	- 1,156	- 1,709		
- 20	- 1,00	- 0,751	- 0,77	- 1,14			- 0,995	- 0,757	- 0,777	- 1,151		
- 10	- 0,50	- 0,380	- 0,39	- 0,58			- 0,501	- 0,383	- 0,392	- 0,581		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+ 10	0,50	0,389	0,40	0,59	0,056	0,055	0,507	0,391	0,397	0,591	0,055	0,054
+ 20	1,02	0,787	0,80	1,19	0,113	0,112	1,019	0,789	0,798	1,192	0,113	0,111
+ 30	1,54	1,194	1,20	1,80	0,173	0,172	1,536	1,196	1,203	1,801	0,173	0,171
+ 40	2,06	1,610	1,61	2,41	0,235	0,234	2,058	1,611	1,611	2,419	0,235	0,232
+ 50	2,58	2,035	2,02	3,04	0,299	0,298	2,585	2,035	2,022	3,047	0,299	0,296
+ 60	3,11	2,467	2,43	3,68	0,364	0,363	3,115	2,467	2,436	3,683	0,365	0,363
+ 70	3,65	2,908	2,85	4,33	0,431	0,431	3,649	2,908	2,850	4,329	0,432	0,431
+ 80	4,19	3,357	3,26	4,99	0,500	0,500	4,186	3,357	3,266	4,983	0,502	0,501
+ 90	4,73	3,813	3,68	5,65	0,571	0,572	4,725	3,813	3,681	5,646	0,573	0,573
+ 100	5,27	4,277	4,10	6,32	0,643	0,645	5,268	4,277	4,095	6,317	0,645	0,647
+ 110	5,81	4,749	4,51	7,00	0,717	0,721	5,812	4,749	4,508	6,996	0,719	0,723
+ 120	6,36	5,227	4,92	7,69	0,792	0,798	6,359	5,227	4,919	7,683	0,795	0,800
+ 130	6,90	5,712	5,33	8,38	0,869	0,877	6,907	5,712	5,327	8,377	0,872	0,879
+ 140	7,45	6,204	5,73	9,08	0,946	0,957	7,457	6,204	5,733	9,078	0,950	0,959
+ 150	8,00	6,703	6,13	9,79	1,025	1,039	8,008	6,702	6,702	9,787	1,029	1,041
+ 160	8,56	7,208	6,53	10,51	1,106	1,121	8,560	7,207	6,539	10,501	1,109	1,124
+ 170	9,11	7,719	6,93	11,23	1,187	1,205	9,113	7,718	6,939	11,222	1,190	1,208
+ 180	9,67	8,236	7,33	11,95	1,269	1,290	9,667	8,235	7,338	11,949	1,273	1,294
+ 190	10,22	8,759	7,73	12,68	1,352	1,377	10,222	8,757	7,737	12,681	1,356	1,380
+ 200	10,78	9,288	8,13	13,42	1,436	1,465	10,777	9,286	8,137	13,419	1,440	1,468
+ 210	11,34	9,823	8,54	14,17	1,521	1,553	11,332	9,820	8,537	14,161	1,525	1,557
+ 220	11,89	10,363	8,94	14,92	1,607	1,643	11,887	10,360	8,938	14,909	1,611	1,647
+ 230	12,45	10,909	9,34	15,67	1,693	1,734	12,442	10,905	9,341	15,661	1,698	1,738
+ 240	13,01	11,459	9,75	16,42	1,780	1,826	12,998	11,456	9,745	16,417	1,785	1,830
+ 250	13,56	12,015	10,16	17,18	1,868	1,918	13,553	12,011	10,151	17,178	1,873	1,923
+ 260	14,12	12,575	10,57	17,95	1,956	2,012	14,108	12,572	10,560	17,942	1,962	2,017
+ 270	14,67	13,140	10,98	18,72	2,045	2,107	14,663	13,137	10,969	18,710	2,051	2,111
+ 280	15,22	13,710	11,39	19,49	2,135	2,202	15,217	13,707	11,381	19,481	2,141	2,207
+ 290	15,77	14,285	11,80	20,26	2,225	2,298	15,771	14,281	11,793	20,256	2,232	2,303
+ 300	16,33	14,864	12,21	21,04	2,316	2,395	16,325	14,860	12,207	21,033	2,323	2,400

NORMES ASA - F.é.m. en millivolts - Jonction de référence à 0 °C

Température en °C	Normes ASA C 96-1-1964 (circulaire 561) Température EIPT 48						Circulaire BNS qui annule et remplace la 561 Température EIPT 68					
	COUPLES :						COUPLES :					
	J	T	K	E	S	R	J	T	K	E	S	R
+ 310	16,88	15,447	12,63	21,82	2,408	2,493	16,879	15,443	12,623	21,814	2,414	2,498
+ 320	17,43	16,035	13,04	22,60	2,499	2,591	17,432	16,030	13,039	22,597	2,506	2,596
+ 330	17,98	16,626	13,46	23,39	2,592	2,690	17,984	16,621	13,456	23,383	2,599	2,695
+ 340	18,54	17,222	13,88	24,18	2,685	2,790	18,537	17,217	13,874	24,171	2,692	2,795
+ 350	19,09	17,821	14,29	24,97	2,778	2,890	19,089	17,816	14,292	24,961	2,786	2,896
+ 360	19,64	18,425	14,71	25,76	2,872	2,991	19,640	18,420	14,712	25,754	2,880	2,997
+ 370	20,20	19,032	15,13	26,56	2,966	3,092	20,192	19,027	15,132	26,549	2,974	3,099
+ 380	20,75	19,642	15,55	27,35	3,061	3,194	20,743	19,638	15,552	27,345	3,069	3,201
+ 390	21,30	20,257	15,98	28,15	3,156	3,296	21,295	20,252	15,974	28,143	3,164	3,304
+ 400	21,85	20,874	16,40	28,95	3,251	3,399	21,846	20,869	16,395	28,943	3,260	3,407
+ 410	22,40		16,82	29,75	3,347	3,502	22,397		16,818	29,744	3,356	3,511
+ 420	22,95		17,24	30,55	3,442	3,607	22,949		17,241	30,546	3,452	3,616
+ 430	23,50		17,67	31,36	3,539	3,712	23,501		17,664	31,350	3,549	3,721
+ 440	24,06		18,09	32,16	3,635	3,817	24,054		18,088	32,155	3,645	3,826
+ 450	24,61		18,51	32,96	3,732	3,923	24,607		18,513	32,960	3,743	3,933
+ 460	25,16		18,94	33,77	3,829	4,029	25,161		18,938	33,767	3,840	4,039
+ 470	25,72		19,36	34,58	3,926	4,134	25,716		19,363	34,574	3,938	4,146
+ 480	26,27		19,79	35,39	4,024	4,241	26,272		19,788	35,382	4,036	4,254
+ 490	26,83		20,22	36,20	4,122	4,348	26,829		20,214	36,190	4,135	4,362
+ 500	27,39		20,65	37,01	4,221	4,455	27,388		20,640	36,999	4,234	4,471
+ 510	27,95		21,07	37,82	4,319	4,563	27,949		21,066	37,808	4,333	4,580
+ 520	28,52		21,50	38,62	4,419	4,672	28,511		21,493	38,617	4,432	4,689
+ 530	29,08		21,92	39,43	4,518	4,782	29,075		21,919	39,426	4,532	4,799
+ 540	29,65		22,35	40,24	4,618	4,893	29,642		22,346	40,236	4,632	4,910
+ 550	30,22		22,78	41,05	4,718	5,004	30,210		22,772	41,045	4,732	5,021
+ 560	30,80		23,20	41,86	4,818	5,115	30,782		23,198	41,853	4,832	5,132
+ 570	31,37		23,63	42,67	4,919	5,226	31,356		23,624	42,662	4,933	5,244
+ 580	31,95		24,06	43,48	5,020	5,338	31,933		24,050	43,470	5,034	5,356
+ 590	32,53		24,49	44,29	5,122	5,450	32,513		24,476	44,278	5,136	5,469
+ 600	33,11		24,91	45,10	5,224	5,563	33,096		24,902	45,085	5,237	5,582
+ 610	33,70		25,34	45,91	5,326	5,677	33,683		25,327	45,891	5,339	5,696
+ 620	34,29		25,76	46,72	5,429	5,792	34,273		25,751	46,697	5,442	5,810
+ 630	34,88		26,19	47,53	5,532	5,907	34,867		26,176	47,502	5,543	5,925
+ 640	35,48		26,61	48,33	5,635	6,022	35,464		26,599	48,306	5,648	6,040
+ 650	36,08		27,03	49,13	5,738	6,137	36,066		27,022	49,109	5,751	6,155
+ 660	36,69		27,45	49,93	5,842	6,252	36,671		27,445	49,911	5,855	6,272
+ 670	37,30		27,87	50,73	5,946	6,368	37,280		27,867	50,713	5,960	6,388
+ 680	37,91		28,29	51,54	6,050	6,485	37,893		28,288	51,513	6,064	6,505
+ 690	38,53		28,72	52,34	6,155	6,602	38,510		28,709	52,312	6,169	6,623
+ 700	39,15		29,14	53,11	6,260	6,720	39,130		29,128	53,110	6,274	6,741
+ 710	39,78		29,56	53,94	6,365	6,838	39,754		29,547	53,907	6,380	6,860
+ 720	40,41		29,97	54,74	6,471	6,957	40,382		29,965	54,703	6,486	6,979
+ 730	41,05		30,39	55,53	6,577	7,076	41,013		30,383	55,498	6,592	7,098
+ 740	41,68		30,81	56,33	6,683	7,195	41,647		30,799	56,291	6,699	7,218
+ 750	42,32		31,23	57,12	6,790	7,315	42,283		31,214	57,083	6,805	7,339
+ 760	42,96		31,65	57,92	6,897	7,436	42,922		31,629	57,873	6,913	7,460
+ 770	43,60		32,06	58,71	7,005	7,557			32,042	58,663	7,020	7,582
+ 780	44,25		32,48	59,50	7,112	7,679			32,455	59,451	7,128	7,703
+ 790	44,89		32,89	60,29	7,220	7,801			32,866	60,237	7,236	7,826
+ 800	45,53		33,30	61,08	7,329	7,924			33,277	61,022	7,345	7,949
+ 810	46,18		33,71	61,86	7,438	8,047			33,686	61,806	7,454	8,071
+ 820	46,82		34,12	62,65	7,547	8,170			34,095	62,588	7,563	8,196
+ 830	47,46		34,53	63,43	7,656	8,294			34,502	63,368	7,672	8,320
+ 840	48,09		34,93	64,21	7,766	8,419			34,909	64,147	7,782	8,445
+ 850	48,73		35,34	64,99	7,876	8,544			35,314	64,924	7,892	8,570
+ 860	49,36		35,75	65,77	7,987	8,669			35,718	65,700	8,003	8,696
+ 870	49,98		36,15	66,54	8,098	8,795			36,121	66,473	8,114	8,822
+ 880			36,55	67,31	8,209	8,921			36,524	67,245	8,225	8,949
+ 890			36,96	68,08	8,320	9,047			36,925	68,015	8,336	9,076
+ 900			37,36	68,85	8,432	9,175			37,325	68,783	8,448	9,203

NORMES ASA - F.é.m. en millivolts - Jonction de référence à 0 °C

Température en °C	Normes ASA C 96-1-1964 (circulaire 561) Température EIPT 48						Circulaire BNS qui annule et remplace la 561 Température EIPT 68					
	COUPLES :						COUPLES :					
	J	T	K	E	S	R	J	T	K	E	S	R
+ 910			37,76	69,62	8,545	9,303			37,724	69,549	8,560	9,331
+ 920			38,16	70,39	8,657	9,431			38,122	70,313	8,673	9,460
+ 930			38,56	71,15	8,770	9,559			38,519	71,075	8,786	9,589
+ 940			38,95	71,92	8,883	9,687			38,915	71,835	8,899	9,718
+ 950			39,35	72,68	8,997	9,816			39,310	72,593	9,012	9,848
+ 960			39,75	73,44	9,111	9,946			39,703	73,350	9,126	9,978
+ 970			40,14	74,20	9,225	10,077			40,096	74,104	9,240	10,109
+ 980			40,53	74,95	9,340	10,208			40,488	74,857	9,355	10,240
+ 990			40,92	75,70	9,455	10,339			40,879	75,608	9,470	10,371
+ 1000			41,31	76,45	9,570	10,471			41,269	76,358	9,585	10,503
+ 1010			41,70		9,686	10,603			41,657		9,700	10,636
+ 1020			42,09		9,802	10,735			42,045		9,816	10,768
+ 1030			42,48		9,918	10,869			42,432		9,932	10,902
+ 1040			42,87		10,035	11,003			42,817		10,048	11,035
+ 1050			43,25		10,152	11,138			43,202		10,165	11,170
+ 1060			43,63		10,269	11,273			43,585		10,282	11,304
+ 1070			44,02		10,387	11,408			43,968		10,400	11,439
+ 1080			44,40		10,505	11,544			44,349		10,517	11,574
+ 1090			44,78		10,623	11,681			44,729		10,635	11,710
+ 1100			45,16		10,741	11,817			45,108		10,754	11,846
+ 1110			45,54		10,860	11,954			45,486		10,871	11,983
+ 1120			45,92		10,979	12,090			45,863		10,991	12,119
+ 1130			46,29		11,098	12,227			46,238		11,110	12,257
+ 1140			46,67		11,217	12,365			46,612		11,227	12,394
+ 1150			47,04		11,336	12,503			46,985		11,348	12,532
+ 1160			47,41		11,456	12,641			47,356		11,467	12,669
+ 1170			47,78		11,575	12,779			47,726		11,587	12,808
+ 1180			48,15		11,695	12,917			48,095		11,707	12,946
+ 1190			48,52		11,815	13,055			48,462		11,827	13,085
+ 1200			48,89		11,935	13,193			48,828		11,947	13,224
+ 1210			49,25		12,055	13,332			49,192		12,067	13,363
+ 1220			49,62		12,175	13,471			49,555		12,188	13,502
+ 1230			49,98		12,296	13,610			49,916		12,308	13,642
+ 1240			50,34		12,416	13,749			50,276		12,429	13,782
+ 1250			50,69		12,536	13,888			50,633		12,550	13,922
+ 1260			51,05		12,657	14,027			50,990		12,671	14,062
+ 1270			51,41		12,777	14,165			51,344		12,792	14,202
+ 1280			51,76		12,897	14,304			51,697		12,913	14,343
+ 1290			52,11		13,018	14,443			52,049		13,034	14,483
+ 1300			52,46		13,138	14,582			52,398		13,155	14,624
+ 1310			52,81		13,258	14,721			52,747		13,276	14,765
+ 1320			53,16		13,378	14,860			53,093		13,397	14,906
+ 1330			53,51		13,498	14,999			53,439		13,519	15,047
+ 1340			53,85		13,618	15,138			53,782		13,640	15,188
+ 1350			54,20		13,738	15,276			54,125		13,761	15,329
+ 1360			54,54		13,858	15,415			54,466		13,883	15,470
+ 1370			54,88		13,978	15,553			54,807		14,004	15,611
+ 1380					14,098	15,692					14,125	15,752
+ 1390					14,217	15,831					14,247	15,893
+ 1400					14,337	15,969					14,368	16,035
+ 1410					14,457	16,108					14,489	16,176
+ 1420					14,576	16,247					14,610	16,317
+ 1430					14,696	16,386					14,731	16,458
+ 1440					14,815	16,524					14,852	16,599
+ 1450					14,935	16,663					14,973	16,741
+ 1460					15,054	16,802					15,094	16,882
+ 1470					15,173	16,940					15,215	17,022
+ 1480					15,292	17,079					15,336	17,163
+ 1490					15,411	17,217					15,456	17,304
+ 1500					15,530	17,355					15,576	17,445

Température en °C	Normes ASA C 96-1-1964 (circulaire 561) Température EIPT 48						Circulaire BNS qui annule et remplace la 561 Température EIPT 68					
	COUPLES :						COUPLES :					
	J	T	K	E	S	R	J	T	K	E	S	R
+ 1510					15,649	17,493						
+ 1520					15,768	17,631					15,697	17,585
+ 1530					15,887	17,768					15,817	17,726
+ 1540					16,006	17,906					15,937	17,866
+ 1550					16,124	18,043					16,057	18,006
+ 1560					16,243	18,179					16,176	18,146
+ 1570					16,361	18,316					16,296	18,286
+ 1580					16,479	18,453					16,415	18,425
+ 1590					16,597	18,590					16,534	18,564
+ 1600					16,716	18,727					16,653	18,703
											16,771	18,842
+ 1610					16,834	18,864						
+ 1620					16,952	19,001					16,890	18,981
+ 1630					17,069	19,137					17,008	19,119
+ 1640					17,187	19,273					17,125	19,257
+ 1650					17,305	19,409					17,243	19,395
+ 1660					17,422	19,545					17,360	19,533
+ 1670					17,539	19,682					17,477	19,670
+ 1680					17,657	19,818					17,594	19,807
+ 1690					17,774	19,954					17,711	19,944
+ 1700					17,891	20,090					17,826	20,080
											17,942	20,215
+ 1710					18,008							
+ 1720					18,124						18,056	20,350
+ 1730					18,241						18,170	20,483
+ 1740					18,358						18,282	20,616
+ 1750					18,474						18,394	20,748
+ 1760					18,590						18,504	20,878
											18,612	21,006

NORME ASA C 96-1-1964

Table de correction pour une température de jonction de référence autre que 0 °C
(Les valeurs données sont à ajouter à la f.é.m. mesurée)

Température en °C	J	T	K	E	S	R	Température en °C	J	T	K	E	S	R
0							26	1,33	1,030	1,04	1,55	0,149	0,148
1	0,05	0,038	0,04	0,06	0,005	0,005	27	1,38	1,071	1,08	1,61	0,155	0,154
2	0,10	0,077	0,08	0,12	0,011	0,011	28	1,43	1,112	1,12	1,67	0,161	0,160
3	0,15	0,116	0,12	0,18	0,016	0,016	29	1,48	1,153	1,16	1,74	0,167	0,166
4	0,20	0,154	0,16	0,23	0,022	0,022	30	1,54	1,194	1,20	1,80	0,173	0,172
5	0,25	0,193	0,20	0,29	0,028	0,027	31	1,59	1,235	1,24	1,86	0,179	0,178
6	0,30	0,232	0,24	0,35	0,033	0,033	32	1,64	1,277	1,28	1,92	0,185	0,184
7	0,35	0,271	0,28	0,41	0,039	0,038	33	1,69	1,318	1,32	1,98	0,191	0,190
8	0,40	0,311	0,32	0,47	0,044	0,043	34	1,74	1,360	1,36	2,04	0,198	0,196
9	0,45	0,350	0,36	0,53	0,050	0,049	35	1,80	1,401	1,40	2,10	0,204	0,203
10	0,50	0,389	0,40	0,59	0,056	0,055	36	1,85	1,443	1,44	2,16	0,210	0,209
11	0,56	0,429	0,44	0,65	0,061	0,061	37	1,90	1,485	1,49	2,23	0,216	0,215
12	0,61	0,468	0,48	0,71	0,067	0,066	38	1,95	1,526	1,53	2,29	0,222	0,221
13	0,66	0,508	0,52	0,77	0,073	0,072	39	2,00	1,568	1,57	2,35	0,229	0,228
14	0,71	0,547	0,56	0,83	0,078	0,078	40	2,06	1,610	1,61	2,41	0,235	0,234
15	0,76	0,587	0,60	0,89	0,084	0,083	41	2,11	1,652	1,65	2,47	0,241	0,240
16	0,81	0,627	0,64	0,95	0,090	0,089	42	2,16	1,694	1,69	2,54	0,247	0,246
17	0,86	0,667	0,68	1,01	0,096	0,095	43	2,22	1,737	1,73	2,60	0,254	0,252
18	0,91	0,707	0,72	1,07	0,102	0,101	44	2,27	1,779	1,77	2,66	0,260	0,259
19	0,97	0,747	0,76	1,13	0,107	0,106	45	2,32	1,821	1,81	2,73	0,266	0,265
20	1,02	0,787	0,80	1,19	0,113	0,112	46	2,37	1,864	1,85	2,79	0,273	0,272
21	1,07	0,827	0,84	1,25	0,119	0,118	47	2,42	1,907	1,90	2,85	0,279	0,278
22	1,12	0,868	0,88	1,31	0,125	0,124	48	2,48	1,949	1,94	2,91	0,286	0,285
23	1,17	0,908	0,92	1,37	0,131	0,130	49	2,53	1,994	1,98	2,98	0,292	0,291
24	1,22	0,949	0,96	1,43	0,137	0,136	50	2,58	2,035	2,02	3,04	0,299	0,298
25	1,28	0,990	1,00	1,49	0,143	0,142							

THERMOCOUPLES - F.é.m. en millivolts - Jonction de référence à 0 °C

Température en °C	Norme Française NF E 18001 (E IPT 48)				Norme Allemande DIN 43710 (E IPT 48)	
	COUPLES :				COUPLES :	
	J	T	N	S	Cuivre-constantan	Fer-constantan
- 200					- 5,70	- 8,15
- 190		- 5,379			- 5,51	- 7,86
- 180		- 5,205			- 5,32	- 7,56
- 170		- 5,018			- 5,12	- 7,25
- 160		- 4,817			- 4,91	- 6,93
- 150		- 4,603			- 4,69	- 6,60
- 140		- 4,377			- 4,46	- 6,26
- 130		- 4,138			- 4,21	- 5,90
- 120		- 3,887			- 3,95	- 5,53
- 110		- 3,624			- 3,68	- 5,15
- 100		- 3,349			- 3,40	- 4,75
- 90		- 3,062			- 3,11	- 4,33
- 80		- 2,764			- 2,81	- 3,89
- 70		- 2,455			- 2,50	- 3,44
- 60		- 2,135			- 2,18	- 2,98
- 50		- 1,804			- 1,85	- 2,51
- 40		- 1,463			- 1,50	- 2,03
- 30		- 1,112			- 1,14	- 1,53
- 20		- 0,751			- 0,77	- 1,02
- 10		- 0,380			- 0,39	- 0,51
0	0	0	0	0	0	0
+ 10	0,50	0,389	0,40	0,056	0,40	0,52
+ 20	1,02	0,787	0,80	0,113	0,80	1,05
+ 30	1,54	1,194	1,20	0,173	1,21	1,58
+ 40	2,06	1,610	1,61	0,235	1,63	2,11
+ 50	2,58	2,035	2,02	0,299	2,05	2,65
+ 70	3,65	2,908	2,85	0,431	2,91	3,73
+ 80	4,19	3,357	3,26	0,500	3,35	4,27
+ 90	4,73	3,813	3,68	0,571	3,80	4,82
+ 100	5,27	4,277	4,10	0,643	4,25	5,37
+ 110	5,81	4,749	4,51	0,717	4,71	5,92
+ 120	6,36	5,227	4,92	0,792	5,18	6,47
+ 130	6,90	5,712	5,33	0,869	5,65	7,03
+ 140	7,45	6,204	5,73	0,946	6,13	7,59
+ 150	8,00	6,703	6,13	1,025	6,62	8,15
+ 160	8,56	7,208	6,53	1,106	7,12	8,71
+ 170	9,11	7,719	6,93	1,187	7,63	9,27
+ 180	9,67	8,236	7,33	1,269	8,15	9,83
+ 190	10,22	8,759	7,73	1,352	8,67	10,39
+ 200	10,78	9,288	8,13	1,436	9,20	10,95
+ 210	11,34	9,823	8,54	1,521	9,74	11,51
+ 220	11,89	10,363	8,94	1,607	10,29	12,07
+ 230	12,45	10,905	9,34	1,693	10,85	12,63
+ 240	13,01	11,459	9,75	1,780	11,41	13,19
+ 250	13,56	12,015	10,16	1,868	11,98	13,75
+ 260	14,12	12,575	10,57	1,956	12,55	14,31
+ 270	14,67	13,140	10,98	2,045	13,13	14,88
+ 280	15,22	13,710	11,39	2,135	13,71	15,44
+ 290	15,77	14,285	11,80	2,225	14,30	16,00
+ 300	16,33	14,864	12,21	2,316	14,90	16,56
+ 310	16,88	15,447	12,63	2,408	15,50	17,12
+ 320	17,43	16,035	13,04	2,499	16,10	17,68
+ 330	17,98	16,626	13,46	2,592	16,70	18,24
+ 340	18,54	17,222	13,88	2,685	17,31	18,80
+ 350	19,09	17,821	14,29	2,778	17,92	19,36
+ 360	19,64		14,71	2,872	18,53	19,92
+ 370	20,20		15,13	2,966	19,14	20,48
+ 380	20,75		15,55	3,061	19,76	21,04
+ 390	21,30		15,98	3,156	20,38	21,60
+ 400	21,85		16,40	3,251	21,00	22,16

THERMOCOUPLES - F.é.m. en millivolts - Jonction de référence à 0 °C

Température en °C	Norme Française NF E 18001 (E IPT 48)				Norme Allemande DIN 43710 (E IPT 48)	
	COUPLES :				COUPLES :	
	J	T	N	S	Cuivre-constantan	Fer-constantan
+ 410	22,40		16,82	3,347	21,62	22,72
+ 420	22,95		17,24	3,442	22,25	23,29
+ 430	23,50		17,67	3,539	22,88	23,86
+ 440	24,06		18,09	3,635	23,51	24,43
+ 450	24,61		18,51	3,732	24,15	25,00
+ 460	25,16		18,94	3,829	24,79	25,57
+ 470	25,72		19,36	3,926	25,44	26,14
+ 480	26,27		19,79	4,024	26,09	26,71
+ 490	26,83		20,22	4,122	26,75	27,28
+ 500	27,39		20,65	4,221	27,41	27,85
+ 510	27,95		21,07	4,319	28,08	28,43
+ 520	28,52		21,50	4,419	28,75	29,01
+ 530	29,08		21,92	4,518	29,43	29,59
+ 540	29,65		22,35	4,618	30,11	30,17
+ 550	30,22		22,78	4,718	30,80	30,75
+ 560	30,80		23,20	4,818	31,49	31,33
+ 570	31,37		23,63	4,919	32,19	31,91
+ 580	31,95		24,06	5,020	32,89	32,49
+ 590	32,53		24,49	5,122	33,60	33,08
+ 600	33,11		24,91	5,224	34,31	33,67
+ 610	33,70		25,34	5,326		34,26
+ 620	34,29		25,76	5,429		34,85
+ 630	34,88		26,19	5,532		35,44
+ 640	35,48		26,61	5,635		36,04
+ 650	36,08		27,03	5,738		36,64
+ 660	36,69		27,45	5,842		37,25
+ 680	37,91		28,29	6,050		38,47
+ 690	38,53		28,72	6,155		39,09
+ 700	39,15		29,14	6,260		39,72
+ 710	39,78		29,56	6,365		40,35
+ 720	40,41		29,97	6,471		40,98
+ 730	41,05		30,39	6,577		41,62
+ 740	41,68		30,81	6,683		42,27
+ 750	42,32		31,23	6,790		42,92
+ 760	42,96		31,65	6,897		43,57
+ 770	43,60		32,06	7,005		44,23
+ 780	44,25		32,48	7,112		44,89
+ 790	44,89		32,89	7,220		45,55
+ 800	45,53		33,30	7,329		46,22
+ 810			33,71	7,438		46,89
+ 820			34,12	7,547		47,57
+ 830			34,53	7,656		48,25
+ 840			34,93	7,766		48,94
+ 850			35,34	7,876		49,63
+ 860			35,75	7,987		50,32
+ 870			36,15	8,098		51,02
+ 880			36,55	8,209		51,72
+ 890			36,96	8,320		52,43
+ 900			37,36	8,432		53,14
+ 910			37,76	8,545		
+ 920			38,16	8,657		
+ 930			38,56	8,770		
+ 940			38,95	8,883		
+ 950			39,35	8,997		
+ 960			39,75	9,111		
+ 970			40,14	9,225		
+ 980			40,53	9,340		
+ 990			40,92	9,455		
+ 1000			41,31	9,570		

THERMOCOUPLES - F.é.m. en millivolts - Jonction de référence à 0 °C

Température en °C	Norme Française NF E 18001 (E IPT 48)				Norme Allemande DIN 43710 (E IPT 48)	
	COUPLES :				COUPLES :	
	J	T	N	S	Cuivre-constantan	Fer-constantan
+ 1010			41,70	9,686		
+ 1020			42,09	9,802		
+ 1030			42,48	9,918		
+ 1040			42,87	10,035		
+ 1050			43,25	10,152		
+ 1060			43,63	10,269		
+ 1070			44,02	10,387		
+ 1080			44,40	10,505		
+ 1090			44,78	10,623		
+ 1100			45,16	10,741		
+ 1110			45,54	10,860		
+ 1120			45,92	10,979		
+ 1130			46,29	11,098		
+ 1140			46,67	11,217		
+ 1150			47,04	11,336		
+ 1160			47,41	11,456		
+ 1170			47,78	11,575		
+ 1180			48,15	11,695		
+ 1190			48,52	11,815		
+ 1200			48,89	11,935		
+ 1210			49,25	12,055		
+ 1220			49,62	12,175		
+ 1230			49,98	12,296		
+ 1240			50,34	12,416		
+ 1250			50,69	12,536		
+ 1260				12,657		
+ 1270				12,777		
+ 1280				12,897		
+ 1290				13,018		
+ 1300				13,138		
+ 1310				13,258		
+ 1320				13,378		
+ 1330				13,498		
+ 1340				13,618		
+ 1350				13,738		
+ 1360				13,858		
+ 1370				13,978		
+ 1380				14,098		
+ 1390				14,217		
+ 1400				14,337		
+ 1410				14,457		
+ 1420				14,576		
+ 1430				14,696		
+ 1440				14,815		
+ 1450				14,935		
+ 1460				15,054		
+ 1470				15,173		
+ 1480				16,292		
+ 1490				15,411		
+ 1500				15,530		
+ 1510				15,649		
+ 1520				15,768		
+ 1530				15,887		
+ 1540				16,006		
+ 1550				16,124		
+ 1560				16,243		
+ 1570				16,361		
+ 1580				16,479		
+ 1590				16,597		
+ 1600				16,716		

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

- (1) : M. ORFFEUIL : Electrothermie Industrielle 1980
- (2) : V. PASCHKIS : Fours électriques industriels 1952
Tomes I et II
- (3) : . MCCADAMS : Transmission de la chaleur
- (4) : R. LOISON : Chauffage industriel et utilisation 1956
des combustibles
- (5) : I. LAKHTINE : Traitements thermiques des 1977
métaux
- (6) : : Mesures thermométriques
- (7) : P. WUITHIER : Raffinage et genie chimique 1972
- (8) : Techniques de l'ingénieur
- (9) : Documents S.N.V.I
- (10) : CHAUSSIN & HILLY : Cours de métallurgie 1965

