

وزارة التعليم العالي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : **METALLURGIE**

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Conception & réalisation
d'un four électrique à résistance
pour la fusion d'alliages
non-ferreux

2 PLANCHES

Proposé par :

K. ABAALI

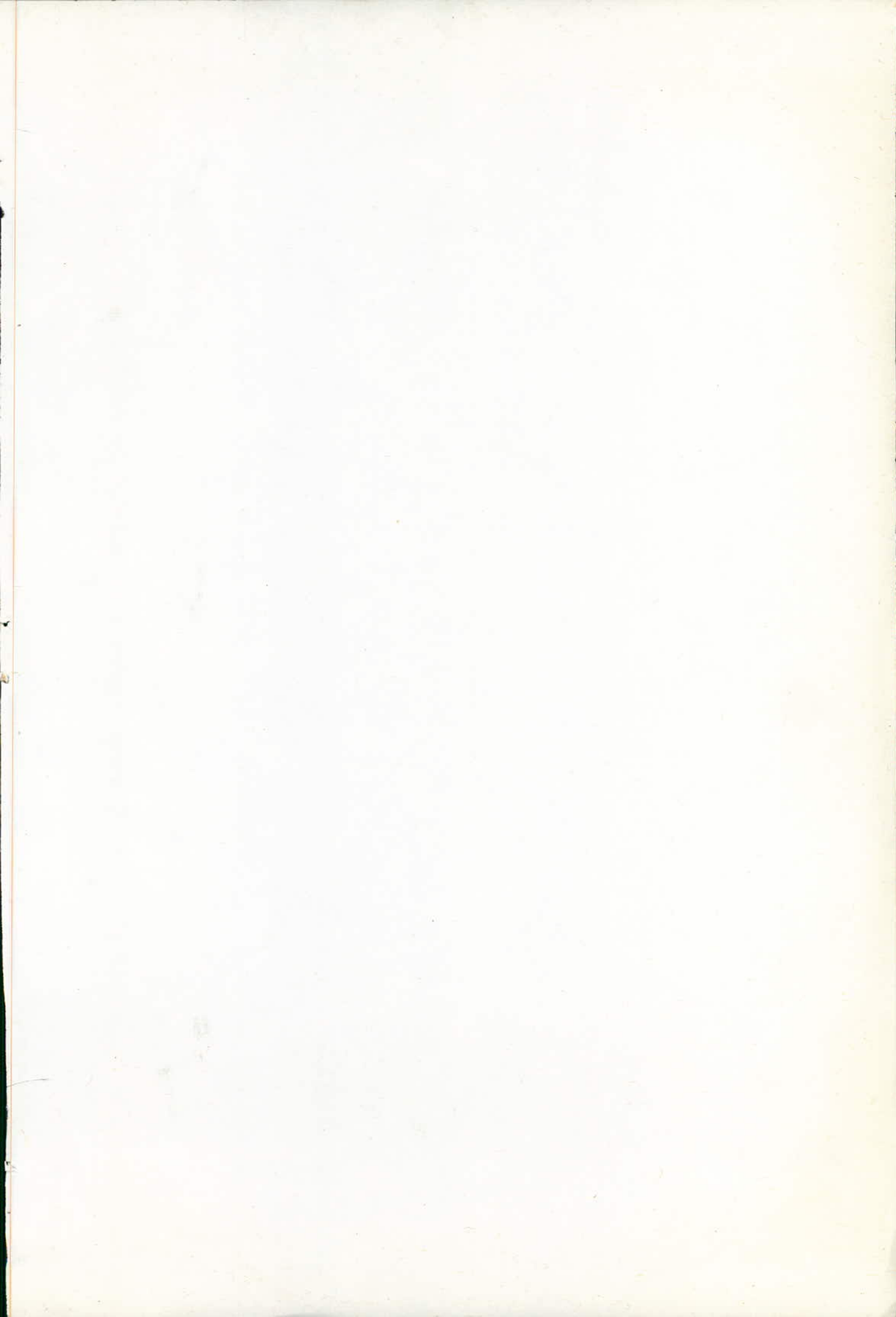
Etudié par :

**Y. AHMANACHE
K. BENHASSINE**

Dirigé par :

K. ABAALI

PROMOTION : **Juin 90**



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فاتحة:

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف
الخلق سيدنا محمد، وبعد:

قال تعالى: "وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ مُتَعِدٌ وَمَنَافِعُ لِلنَّاسِ"
"Nous révélâmes le fer, instrument terrible,
mais source de commodités pour les mortels."

وقال علي لسان ذو القرنين: "أتوفى زبر الحديد حتى إذا ساوى
بين الصدين قال أنفخوا حقاً إذا جعله ناراً قال عاتقني أفرغ
عليه قهراً" الكهف/26

"Chargés des blocs ferreux jusqu'à élever un remblai entre
les deux montagnes. Lorsque ce but fut atteint: "que l'on
manœuvre les soufflets, dit le conquérant et qu'on fasse
rougir le métal." lorsque le fer eut rougi, il ordonna:
«dieu l'on verse par dessus de l'airain fondu" la couverture

اللهم علمنا ما ينفعنا وزدنا علماً إنك أنت
العليم الحكيم، وأجعلنا خالصاً لوجهك الكريم وحدك
لا شريك لك، وآخر صواناً لأن الحمد لله رب العالمين.

كريم بن حسين
يحيى أحماش

D E D I C A C E S

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail à mon très cher père et ma très chère mère qui m'ont beaucoup aidé et soutenu dans mes études.

” اللّٰهُ أرحم والدي كما ربياني صغيراً ”

- à mon petit grand frère **NABIL**
- à ma soeur **OLFA**
- à ma fiancée **YASMINE**

Karin BEN HASSINE

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui m'ont été d'un apport inestimable tout au long de mes études et pour lesquels je dis :

” ربي أودعني أن أشكر نعمتك القى أنعت علي وعلى والدي
وأن أعمل مبالحاً ترضاه وأدخلي برحمتك في علك المالين ”

Ainsi qu'à ma soeur et mes frères auxquels je souhaite beaucoup de succès dans la vie.

Yahia ABYANACHE

REMERCIEMENTS

A l'issue de ce modeste travail, nous tenons à remercier notre Encadreur **Monsieur K. ABADLI** pour son aide et ses conseils tout au long de notre étude.

Nos sincères remerciements vont également à :

- **Monsieur HAKAOUI Hassène**
- **Monsieur TAHMI Enseignant à l'E.N.P.**
- **Monsieur TALANTIKIT**

pour leurs aides morales et pratique.

- **Mourad et Ali BOUCHERIT** pour leurs aides pratiques.

Ainsi qu'à tous ceux qui ont, de près ou de loin, participer à l'aboutissement de ce projet.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I ELECTROTHERMIE INDUSTRIELLE

- 1.1 PRINCIPES FONDAMENTAUX DU CHAUFFAGE PAR RESISTANCE 4
- 1.1.1. PRINCIPES FONDAMENTAUX DU TRANSFERT DE CHALEUR 4
 - 1.1.1.1. ECHANGE THERMIQUE PAR CONDUCTION
 - 1.1.1.2. ECHANGE THERMIQUE PAR CONVECTION
 - 1.1.1.3. ECHANGE THERMIQUE PAR RAYONNEMENT
 - 1.1.1.4. ECHANGE THERMIQUE PAR RAYONNEMENT
 - 1.1.1.5. ECHANGE THERMIQUE GLOBAL
- 1.1.2. PUISSANCES ELECTRIQUES 15
 - 1.1.2.1. ENERGIE ABSORBEE
 - 1.1.2.2. PERTES THERMIQUES
 - 1.1.2.3. PUISSANCES UTILES
- 1.1.3. RENDEMENT DES FOURS ELECTRIQUES A RESISTANCE 15
 - 1.1.3.1. RENDEMENTS ELECTRIQUES
 - 1.1.3.2. RENDEMENTS THERMIQUES
 - 1.1.3.3. RENDEMENTS INDUSTRIELS
- 1.2. CONSTITUTION DES FOURS ELECTRIQUES 19
 - 1.2.1. LES MATERIAUX REFRACTAIRES 19
 - 1.2.2. LA REGULATION 20
 - 1.2.3. LES CAPTEURS DE TEMPERATURE 25
 - 1.2.4. LES RESISTANCES 30

- 1.3. LES DIFFERENTS TYPES DE FOUR A FUSION
 - 1.3.1. FOURS A COMBUSTIBLE
 - 1.3.2. FOURS ELECTRIQUES A RESISTANCE
 - 1.3.3. FOURS A INDUCTION
 - 1.3.4. FOURS A ARC ELECTRIQUE

- 1.4. EVOLUTION DE LA TECHNOLOGIE DES FOURS ELECTRIQUES A RESISTANCE
 - 1.4.1. INTERETS ET LIMITES DES FOURS A RESISTANCES
 - 1.4.2. FOURS A RESISTANCES A HAUTE DENSITE DE PUISSANCE
 - 1.4.3. FOURS A RESISTANCES SOUS-VIDE

CHAPITRE II

ETUDE DE CONCEPTION ET REALISATION

- 2.1. INTRODUCTION
- 2.2. CONCEPTION ET REALISATION
 - 2.2.1. PARTIE MECANIQUE
 - 2.2.2. PARTIES ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE
 - 2.2.3. PARTIE THERMIQUE
 - 2.2.3.1. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES
 - 2.2.3.2. EVALUATION DE LA PUISSANCE A INSTALLER
- 2.3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES D'UTILISATION

CHAPITRE III

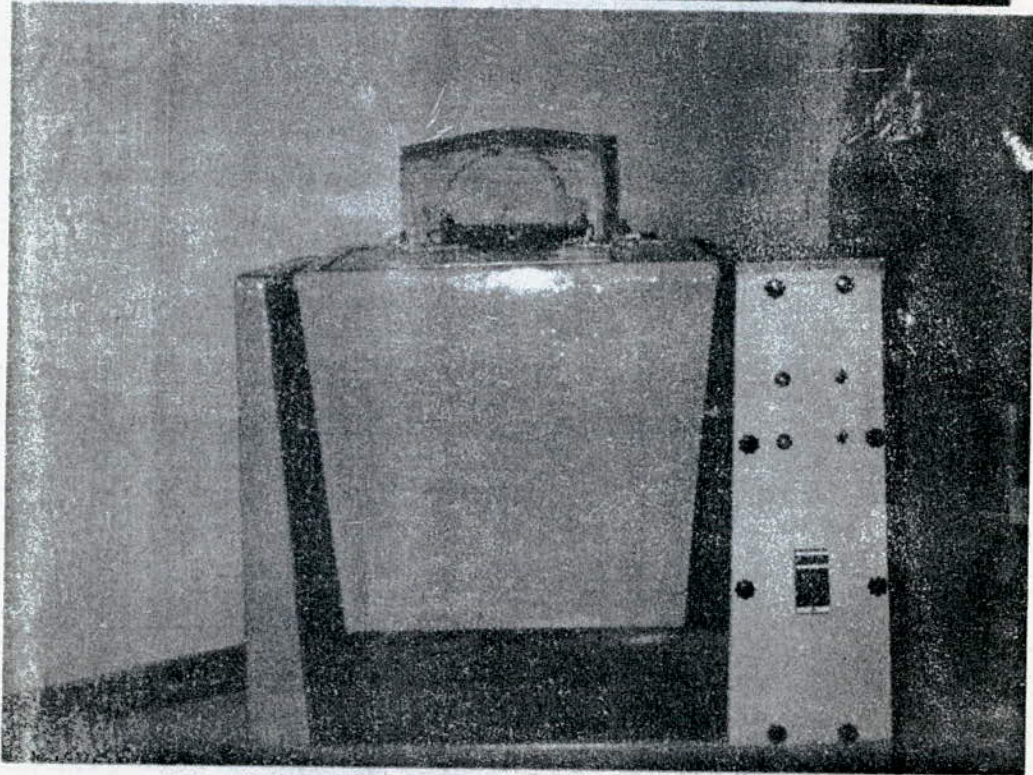
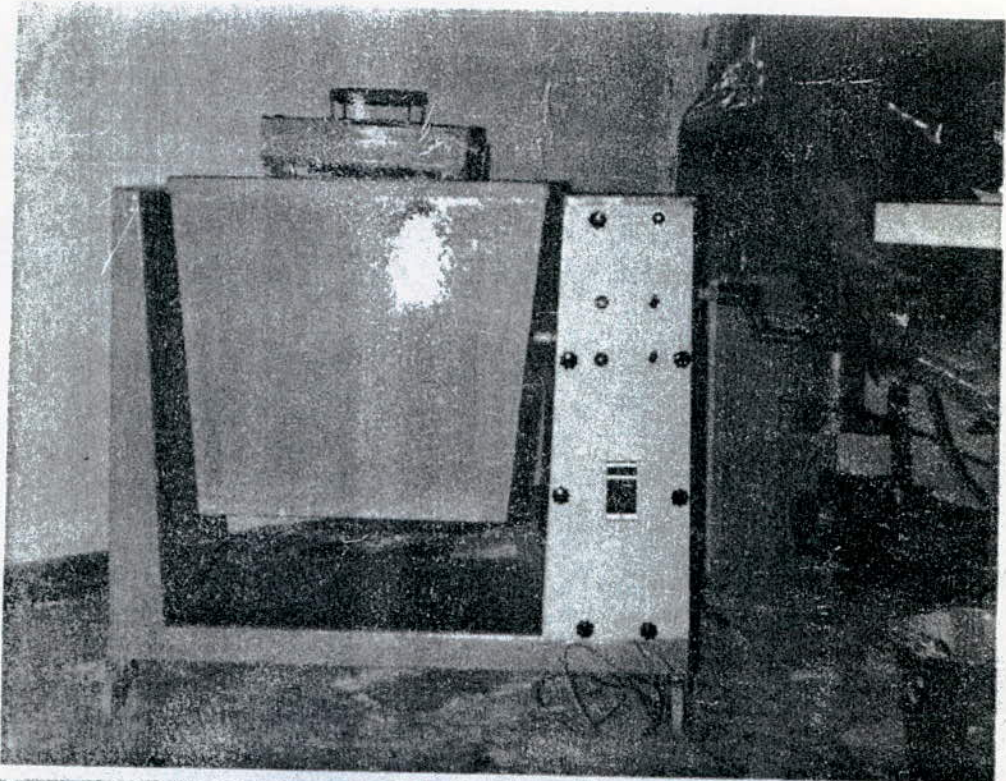
ETUDES DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DU FOUR

- 3.1 ETUDE CINETIQUE
- 3.2. CONDITIONNEMENT DE FONCTIONNEMENT

CHAPITRE IV

PERSPECTIVES ET DEVELOPPEMENTS

CONCLUSION



INTRODUCTION

Tous les fours fonctionnent par production d'énergie sous forme de chaleur, cette production est assurée par la combustion de certains combustibles, cependant il existe une exception à cette règle ; les fours électriques lesquels utilisent la chaleur dégagée par des résistances électriques.

Le four électrique est une invention relativement récente, la mise en service de ces fours débutait vers les années 1920 et leur utilisation courante vers 1940.

De notre temps, les fours électriques sont très utilisés dans les domaines de l'industrie et de la recherche surtout par les métallurgistes, les mécaniciens et les chimistes, cependant ces fours présentent des avantages et quelques inconvénients particuliers :

ils sont transportables et peuvent-être installés presque partout, leurs dimensions peuvent-être réduites, les traitements à l'électricité ne présentent pas de dangers importants, le pire qui peut arriver est, soit la destruction des éléments chauffants et qui sont facilement remplaçables, soit les mauvaises opérations thermiques (traitements ou fusion).

Contrairement à ces avantages, leurs inconvénients restent le coût très élevé et la faible durée de vie par rapport aux fours à combustion.

L'un des fours électriques présent dans le domaine de l'industrie et de la recherche est le four à fusion. Ce type de four sert à la réalisation de différents alliages par fusion des métaux et à l'étude cinétique des métaux et alliages (refroidissement, chauffage, solidification).

Notre projet consiste en une étude technologique de la construction des fours (forme, éléments chauffants, transfert de chaleur, isolation thermique, régulation, évaluation de la température) et la réalisation d'un four de fusion électrique destiné au laboratoire et, est conçu pour la fusion des métaux et alliages non ferreux dont la température de fusion ne dépassant pas 1000 °C.

Ce four est un prototype, dont le modèle est de notre propre conception, réalisé entièrement à l'Ecole Nationale Polytechnique et aux Départements de Génie Mécanique, Génie minier et Métallurgie, pouvant-être amélioré et étalé à l'échelle industrielle, ces perspectives d'amélioration et d'extrapolation seront développées dans le mémoire.

Le présent mémoire est structuré de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le transfert thermique, les différents types de fours à fusion, la constitution et la puissance des fours à résistance.
- Dans le deuxième chapitre nous exposons l'étude technologique du four et ses caractéristiques techniques.
- Le chapitre trois est destiné à l'étude des conditions de fonctionnement et applications du four (fusion d'alliage, d'aluminium, solidification d'un lingot).
- Au chapitre quatre des propositions sont faites quant aux améliorations et aux développements pouvant-être réalisés sur le four, ainsi qu'une extension à l'échelle industrielle.

A la fin des chapitres une conclusion générale est donnée sur tout le travail réalisé.

Des annexes sont situées à la fin de ce mémoire regroupant les différents tableaux des caractéristiques cités dans le texte.

CHAPITRE I

ELECTROTHERMIE INDUSTRIELLE

La loi de Fourier permet d'étudier les problèmes de conduction thermique tant en régime variable, qu'en régime permanent, qui est caractérisé par le fait que, la température demeure constante en chaque point.

Dans le cas où, le milieu est à une dimension où la variation de température est unidimensionnelle, la loi de Fourier est mise sous la forme :

$$\frac{d\Phi}{ds} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (2)$$

On peut donc conclure que, d'une part, la direction de l'écoulement du flux de chaleur coïncide avec celle du gradient thermique et que d'autre part, le flux de chaleur par unité de surface est proportionnel au gradient de température. Le signe (-) signifie que le flux est dirigé de la région chaude vers la région froide.

L'application de la loi de Fourier à des corps de formes géométriques simples en régime permanent, donc la conductivité thermique est supposée constante, a permis d'obtenir les résultats suivants :

1) Paroi composite plane :

Il est rare que les parois des fours à résistances soient constituées d'un matériau unique, généralement elle comporte une série de matériaux qui assurent chacun un rôle bien précis dans la constitution du four (réfractaires, isolant thermique, revêtement anticorrosion).

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

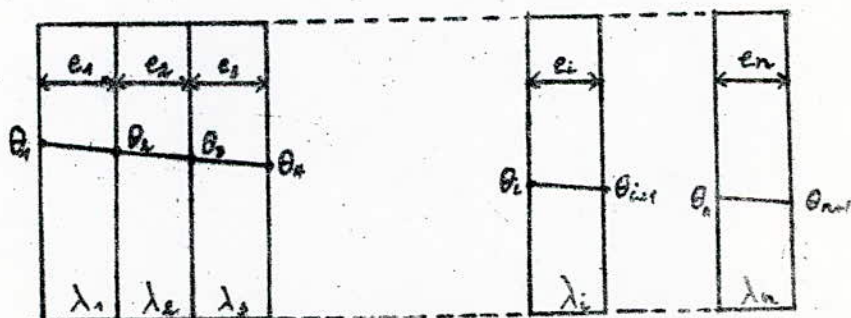


fig. a. Flux de chaleur dans une paroi composite plane

$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{e_1/\lambda_1 S} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{e_2/\lambda_2 S} = \frac{\theta_3 - \theta_4}{e_3/\lambda_3 S} = \dots = \frac{\theta_n - \theta_{n+1}}{e_n/\lambda_n S} \quad (3)$$

De cette expression on peut déduire :

$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{\sum e_i / \lambda_i S} \quad (4)$$

Le terme $R = \sum e_i / \lambda_i S$ représente la résistance thermique

de la paroi composite. Elle est égale à la somme des résistances thermiques des parois constituants.

Donc $\theta_1 - \theta_{n+1} = R \cdot \Phi$ (5)

Pour une plaque de rang "i" ; la répartition de la température est présentée par :

$$\theta_x = \theta_i - \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{R S} \cdot \frac{x}{\lambda_i} \quad (6)$$

On désigne la distance entre x_i et x_{i-1} par x

Les courbes de répartition des températures sont des segments de droite. Les coefficients angulaires sont inversement proportionnels aux coefficients de conductivité thermique des parois.

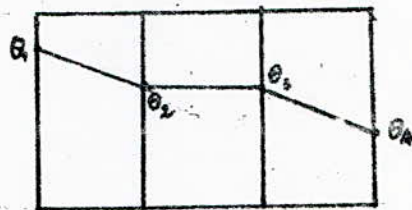
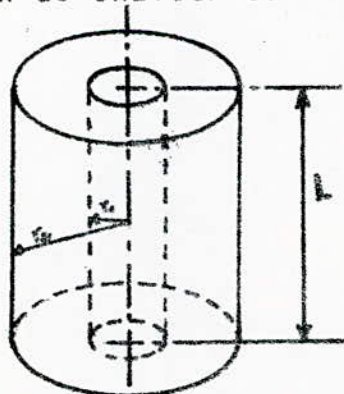


fig. a2. paroi composite plane

2) Paroi composite cylindrique :

En considérant un cylindre creux de très grande longueur par rapport aux rayons intérieurs r_1 et extérieurs r_2 maintenus à des températures constantes sur toute la surface θ_1 et θ_2

le flux de chaleur est exprimé par :



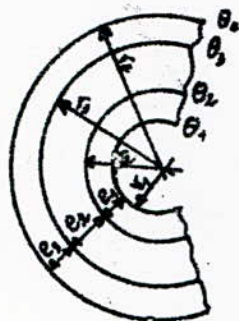
$$\Phi = 2\pi \lambda L \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad (7)$$

la résistance thermique s'exprime par :

$$R = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \lambda} \quad (8)$$

fig. b, Flux de chaleur dans une paroi composite cylindrique

Pour un tube cylindrique composite comprenant n couches, l'expression du flux thermique par unite de longueur est :



$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{\sum \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\lambda_i}} \quad (9)$$

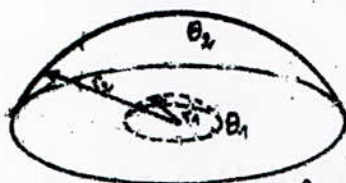
et finalement $\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{R}$ (10)

fig b. Paroi composite cylindrique

3) Paroi composite sphérique :

Dans le cas où les parois sont sphériques, de rayons intérieur r1 et extérieurs r2 et dont les surfaces sont à des températures uniformes et constantes θ_1 et θ_2 .

Le flux thermique s'exprime par :



$$\Phi = \frac{4\pi\lambda(\theta_1 - \theta_2)}{1/r_1 - 1/r_2} \quad (11)$$

fig.c Flux de chaleur dans une paroi composite sphérique

Pour une paroi composite comprenant n couches, l'expression du flux thermique sera alors :

$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{\sum \frac{(1/r_i) - (1/r_{i+1})}{4\pi\lambda_i}} \quad (12)$$

• Régimes transitoires :

Les phases de chauffage et de refroidissement d'une charge dans un four, sont régies par les lois du régime variable. L'équation générale décrivant le régime s'exprime par :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \Delta \theta \quad (13)$$

avec $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$: la diffusivité thermique

et $\Delta \theta = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$

le laplacien de température

Cette équation, montre que, l'échauffement d'une charge (traduit par la vitesse de chauffage) est accéléré par la conductivité thermique λ et, est freiné par la chaleur spécifique C , et la masse volumique γ .

L'étude mathématique des régimes variables est complexe. Dans le cas d'un corps semi infini, limité par une surface plane, dont la température de surface à l'instant initial est portée brusquement de θ_0 à θ_1 . La solution de l'équation est de la forme :

$$\frac{\theta - \theta_1}{\theta_0 - \theta_1} = 2 G \left(\frac{x}{(2 at)^{1/2}} \right) \quad (14)$$

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

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (15)$$

$$\frac{\theta - \theta_1}{\theta_0 - \theta_1} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{2at}}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (16)$$

L'évolution de la température dans un massif semi infini est représentée par les figures suivantes :

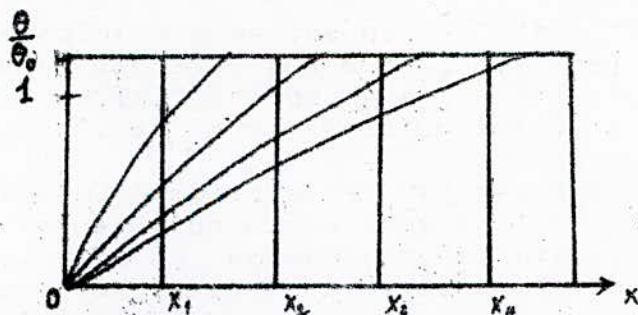


Figure n° 1
Distribution de la température à un instant donné.

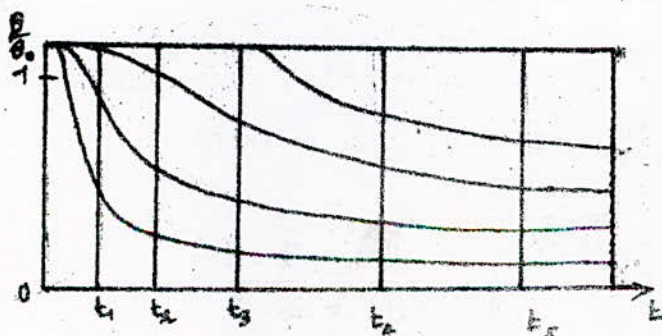


Figure n° 2
variation de la température dans le temps à une distance donnée de la surface

1.1.1.3 ECHANGE DE CHALEUR PAR CONVECTION

La convection est un mode de transfert qui se produit uniquement au sein des milieux fluides et liquides ou gazeux et qui est caractérisé par la propagation de la chaleur dans un fluide, dont les molécules sont en mouvement ; ce qui implique une inhomogénéité spatiale de la température au sein du milieu. La convection intervient en particulier dans les échanges thermiques entre une paroi (solide) et un fluide en mouvement.

Ainsi, si nous considérons un solide baignant dans un fluide en mouvement, de la chaleur est échangée par conduction thermique entre le solide et les particules du fluide se trouvant à son contact.

En raison du mouvement du fluide, on remarque qu'à un point du solide il n'y a pas un contact continu avec la même particule du fluide, mais, une sans celle collision entre ce solide et les différentes particules du fluide qui cèdent ou absorbent de la chaleur, d'où un échange de chaleur successif entre le solide et les particules du fluide.

La convection thermique, résulte de la combinaison :
conduction thermique - mouvement du fluide.

1) Régimes permanents :

On distingue deux formes de convection :

a)- La convection naturelle :

Caractérisée par le mouvement du fluide résultant de la différence de densité provoquée par la variation de température permettant le transfert de la chaleur des régions chaudes vers les régions froides.

b)- La convection forcée :

Le fluide est mis en mouvement par une action extérieure suivant un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques, telle une pompe ou un ventilateur.

La convection forcée peut-être de deux natures :

- un simple brassage mécanique de l'atmosphère entourant la charge, est destiné à homogénéiser sa température.
- Une circulation dirigée de l'atmosphère touchant successivement les résistances et la charge afin d'accélérer le transfert thermique tout en assurant une excellente homogénéité de la température.

Ainsi, la convection intervient essentiellement pour les fours et étuves fonctionnant à basse température (jusqu'à 500°). Elle peut assurer dans ce domaine de température, des densités de puissances élevées et une excellente répartition de la température (productivité élevée).

c)- Coefficient de convection :

Le flux de chaleur par convection, à travers une surface entourant un point de la surface du solide et l'ambiance, peut-être évalué par la relation :

$$d\Phi = \alpha ds (\theta_a - \theta_s) \quad (17)$$

$d\Phi$	=	$\alpha ds (\theta_a - \theta_s)$	(17)
Φ	:	flux de chaleur échangé	w
s	:	surface d'échange	m ²
θ_a	:	température de l'ambiance	°c
θ_s	:	température de la surface solide	°c
α	:	coefficient de convection	w/m ² °c

Le coefficient de convection (α) n'étant pas constant, il dépend de plusieurs facteurs tels que :

- Les caractéristiques du fluide : coefficient de conduction, chaleur spécifique, masse volumique, viscosité, vitesse, température.
- La nature de l'écoulement : turbulent ou laminaire
- Les caractéristiques de la paroi : forme, dimension, rugosité, température.
- La position respective du fluide et de la paroi : Angle d'attaque de la paroi par le fluide.

Le coefficient de convection peut ainsi prendre les valeurs suivantes selon le type de paroi :

a - Pour les parois planes

$$\alpha = A (\theta_a - \theta_s)^{0,25} \quad (18)$$

- 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

b - Pour les parois cylindriques

$$\alpha = 1,32 \frac{(\theta_a - \theta_s)^{0,25}}{d} \quad (19)$$

d : Etant le diamètre du cylindre

Le coefficient de convection est faible à l'air calme. Pour augmenter les échanges thermiques, on utilise la convection forcée.

2) Régimes variables

Comme dans le cas des échanges par conduction, les régimes variables de la convection intéressent les phases de chauffage et de refroidissement des corps. La direction du flux de chaleur dépend des températures des surfaces. Chaque fois que le gradient thermique tend à diminuer, le flux varie, comme le montre les figures suivantes :

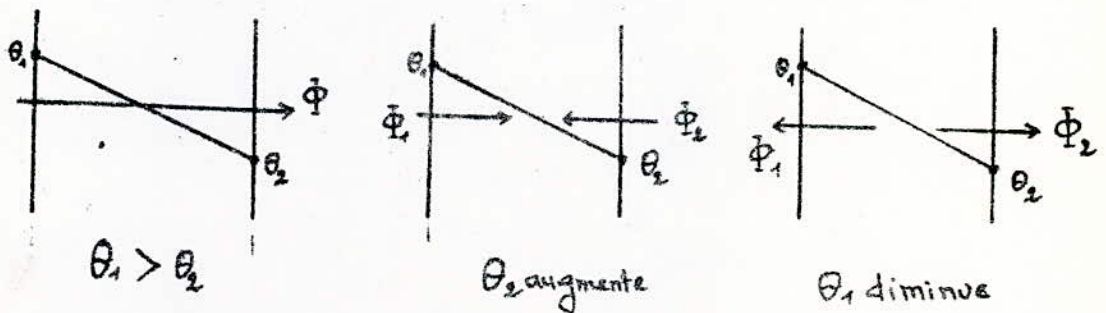


Figure n°3 : Effet du gradient thermique sur le flux de chaleur

Le régime variable en convection est décrit par la loi :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \Delta \theta \quad (20)$$

$$\text{avec } a = \frac{\lambda}{c \cdot \delta}$$

L'effet des paramètres λ , c et δ sur le processus, est identique à celui de la conduction (voir annexe).

1.1.1.4. ECHANGE DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT :

Contrairement aux modes de transmission de chaleur par conduction et par convection qui dépendent de la nature du matériau, le processus de transmission de chaleur par rayonnement est basé sur un phénomène électromagnétique avec un spectre infrarouge.

Le rayonnement est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un autre à basse température, lorsque les corps sont séparés dans l'espace ou même lorsqu'un vide existe entre eux.

Le terme rayonnement est généralement appliqué à toute sorte de phénomène d'onde électromagnétique. Mais, dans la transmission de chaleur, les seuls phénomènes qui ont de l'intérêt sont ceux qui résultent d'une différence de température et qui peuvent transporter de l'énergie à travers un milieu transparent, ou à travers l'espace. L'énergie transmise de cette manière est désignée par la chaleur rayonnée.

Le rayonnement dans sa propagation ne nécessite par une intervention extérieure.

A haute température, le rayonnement est le facteur déterminant pour le transfert thermique dans les fours électriques. Car, à partir de 500°C , l'échange thermique entre résistances et charges se fait essentiellement par rayonnement et peu de convection et au delà de 750°C uniquement par rayonnement.

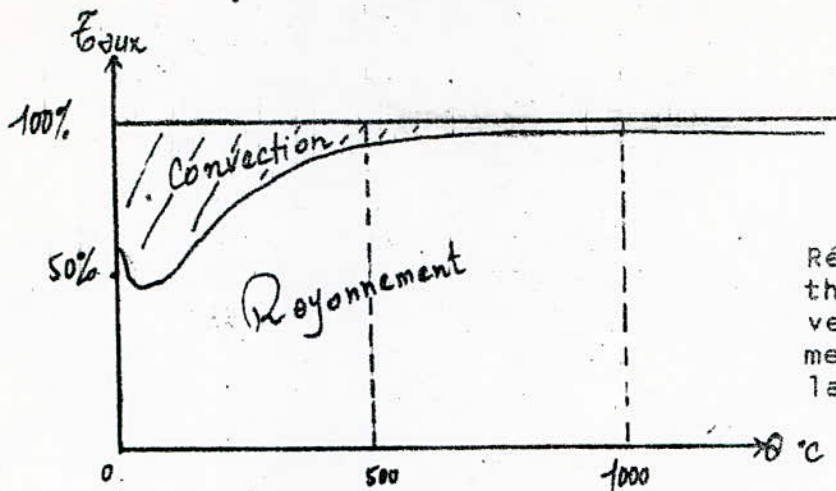


Figure n° 4
Répartition du flux
thermique entre con-
vection et rayonne-
ment en fonction de
la température

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

$$\Phi = E_{RC} \cdot S \cdot F \cdot \sigma \cdot (T_R^4 - T_C^4) \quad (21)$$

Φ : Flux de chaleur échangé entre la résistance et la charge (w)

E_{RC} : coefficient de rayonnement tenant compte des émissivités E_R et E_C ; des résistances et de la charge.

S : Aire de la surface émettrice [m^2]

F : Facteur d'angle de la surface réceptrice vers la surface émettrice

σ : Constante de BOLTZMANN : $5,73 \cdot 10^{-8}$ [$w/m^2 K$]

T_R et T_C : Températures absolues en [K] de la résistance et de la charge.

Nous vous proposons d'étudier quelques cas pratiques de transmission par rayonnement.

1)- Rayonnement entre deux surfaces de solides séparés par un milieu non absorbant :

$$\Phi = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \cdot \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - 1} \quad (22)$$

2) - Rayonnement entre deux sphères concentriques :

Soit une sphère de surface S_1 de facteur d'émission E_1 et de température T_1 et une sphère de surface S_2 , de facteur d'émission E_2 et de température T_2 telle que la surface S_1 enrobe la surface S_2 .

Le flux total d'échange s'écrit :

$$\Phi = S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (23)$$

1.1.1.5. ECHAUFFEMENT DES CORPS :

Le processus thermique conduisant à la variation de la température dans un corps, est constitué par la combinaison des phénomènes de transmission de la chaleur par rayonnement, convection et conduction. L'étude mathématique décrivant le processus de l'échauffement d'un corps est très complexe. Cependant, dans de nombreux cas en procédant à des approximations et des simplifications, l'étude a permis de donner des résultats avec une précision acceptable.

L'énergie totale nécessaire à l'échauffement des corps est égale à la somme de :

- La chaleur sensible $w_1 = mc (\theta_2 - \theta_1) \quad (24)$
- La chaleur latente de changement d'état ou la chaleur de réaction chimique $w_2 = m_l$

Ces notions permettent le calcul des besoins thermiques et les puissances utiles.

La chaleur transmise à travers une paroi baignée par deux fluides où l'échauffement des corps est égale à :

$$Q = m C_m (\theta_1 - \theta_0) \quad (25)$$

1.1.2. PUISSANCE ELECTRIQUE

L'énergie émise par les résistances électriques sert à :

- Elever la température de la charge à la température requise
- Chauffer les matériaux constitutifs du four
- Compenser les pertes thermiques du four

L'évaluation du bilan thermique et de la puissance à installer est réalisable avec une précision acceptable.

1.1.2.1. ENERGIE ABSORBEE

1) Puissance dissipée dans une résistance

Le chauffage électrique est basé sur la transformation de la puissance électrique en chaleur. Cette transformation s'opère par effet Joule selon la relation :

$$P = \frac{U^2}{R} \quad [W] \quad (26)$$

Dans le cas du courant alternatif la puissance active est égale à :

$$P = UI \cos \varphi \quad (27)$$

tel que φ , est l'angle de déphasage entre la tension alternative et I, l'intensité du courant.

2) Energie absorbée par la charge

La quantité de chaleur absorbée est égale à :

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad [kwh] \quad (28)$$

Avec Q_1 ; la chaleur sensible et Q_2 , la chaleur latente nécessaire aux changements d'états (fusion, vaporisation)

$$Q_1 = mc (\theta_2 - \theta_1) \quad [kwh]$$

$$Q_2 = m_2 L \quad [kwh]$$

m2 : la masse d'une partie de la charge concernée par le changement d'état. Dans le cas où plusieurs changements d'états se produisent, l'énergie absorbée sera la somme des chaleurs sensibles sur les différents intervalles sans changement d'état et des chaleurs latentes.

$$Q = \int_{T1}^{T2} m_1 c_1 dT + mL1 + \int_{T2}^{T3} m_2 c_2 dT + mL2 + \dots (28)$$

- Enfin, lorsque des réactions chimiques interviennent au sein de la charge, la chaleur de la réaction vient se retrancher ou s'ajouter et cela, selon la nature exothermique ou endothermique de la réaction.

3) Energie absorbée par les parois

L'énergie absorbée par les parois est calculée à partir des capacités calorifiques $m_i c_i$ de, chacun des matériaux constitutifs des parois et des températures θ_i des différentes surfaces de ces matériaux.

La chaleur emmagasinée dans les parois favorise l'homogénéisation de la température dans l'enceinte du four, évitant ainsi, une variation brutale de la température. Au cours du refroidissement, cette énergie se perd progressivement dans l'enceinte. Le bilan thermique et le rendement du four sont très sensibles à cette énergie.

1.1.2.2. PERTES THERMIQUES

Les pertes thermiques dans le four se produisent de plusieurs façons :

1) A travers les parois

Les pertes sont dues à l'existence d'un gradient thermique entre l'enceinte et l'extérieur. Un flux de chaleur s'écoule à travers les parois selon le mécanisme de conduction auquel on rajoute la convection à l'extérieur des parois. On tend ainsi à diminuer les pertes par une meilleure isolation.

2) A travers les Ouvertures :

Elles peuvent se produire aux ouvertures des portes et par les fentes :
(fissures, mauvaises étanchéité..)

3) Par les conduites d'évacuation des produits volatiles :

Ces pertes se produisent lorsque des opérations thermiques nécessitent l'évacuation de vapeurs, de solvant.... Ces pertes sont sensiblement égales aux énergies emmagasinées dans ces produits.

4) Les pertes diverses

Elles sont constituées par les surfaces libres des baigns, par refroidissement (joints...). Ces pertes peuvent-être réduites grâce à une analyse rigoureuse de leurs causes.

1.1.2.3. PUISSANCE UTILE :

Dans le cas des fours discontinus, la puissance utile est définie par

$$W = \frac{C1 + C2}{t} + a \cdot D \quad [Kw] \quad (29)$$

C1 = Q = chaleur absorbée par la charge, par les supports,..
[Kwh]

C2 = Chaleur accumulée dans les parois [Kwh]

t = la durée de montée en température [h]

D : Déperditions thermiques à la température finale du four [Kw]

a : coefficient tenant compte de la valeur moyenne des déperditions pendant la montée, "a" est compris entre 0,6 et 0,8.

1.1.3. RENDEMENT DES FOURS ELECTRIQUES A RESISTANCES

1.1.3.1. RENDEMENT ELECTRIQUE :

Le rendement électrique est donné par :

$$\eta_1 = \frac{Q_1}{Q} \quad (30)$$

représente le rapport de l'énergie électrique Q_1 transformée en énergie thermique dans l'enceinte, sur l'énergie électrique Q fournie au four.

La différence $Q - Q_1$ est égale aux pertes thermiques dans les lignes d'amenées de courant et dans les appareils électriques de réglages et de transformation. η_1 est généralement de l'ordre de 0,95.

1.1.3.2. RENDEMENT THERMIQUE :

Il est défini par le rapport

$$\eta_2 = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (31)$$

où Q_2 est l'énergie emmagasinée en fin d'opération thermique dans la charge. La différence $Q_1 - Q_2$ représente les pertes dans le four.

Ce rendement dépend du type et de la constitution du four, ainsi que de son utilisation.

1.1.3.3. RENDEMENT INDUSTRIEL

Le rendement industriel ou rendement pratique dépend du produit, $\eta_1 \times \eta_2$ et de sa variation avec le temps.

Il peut-être évalué à partir des consommations spécifiques d'énergies, mesurées sur une longue période (mois, trimestre, année).

η , représente la valeur moyenne du rendement électrothermique $\eta_1 \times \eta_2$ sur une longue période.

1.2. CONSTITUTION DES FOURS ELECTRIQUES

1.2.1. LES MATERIAUX REFRACTAIRES

1.2.1.1. INTRODUCTION

Les parties intérieures des fours métallurgiques sont revêtues par des matériaux dits réfractaires ; les produits réfractaires sont des matériaux minéraux non métalliques dont le point de fusion est supérieur à 1500 °C.

Un haut point de fusion seul, ne donne pas forcément un bon réfractaire, des qualités optimales requises pour une meilleure utilisation de ces produits sont :

- Les températures de ramollissement et de fusion doivent être élevées et largement supérieures à celles d'emploi du four, et la capacité calorifique et surtout la conductivité thermique des réfractaires doivent être les plus faibles possibles.
- Avoir une excellente résistance mécanique à haute température, de même résister aux efforts de compression et de traction, aux chocs thermiques consécutifs à des variations brutales de température.

1.2. CONSTITUTION DES FOURS ELECTRIQUES

1.2.1. LES MATERIAUX REFRACTAIRES

- Assurer de point de vue chimique une meilleure résistance aux phénomènes d'oxydation et de réduction.

1.2.1.1. INTRODUCTION

- Avoir une excellente résistance d'isolement électrique.

Les parties intérieures des fours métallurgiques sont revêtues par des matériaux dits réfractaires ; les produits réfractaires sont des matériaux minéraux non métalliques dont le point de fusion est supérieur à 1500 °C.

- Résister à l'état chaud à l'action chimique des laitiers, des métaux liquides et des gaz.

Un haut point de fusion seul, ne donne pas forcément un bon réfractaire, des qualités optimales requises pour une meilleure utilisation de ces produits sont :

- Des qualités morphologiques : ces produits doivent être facilement usinables et élaborables sous des formes et des dimensions très variées.
- Les températures de ramollissement et de fusion doivent être élevées et largement supérieures à celles d'emploi du four, et la capacité calorifique et surtout la conductivité thermique des réfractaires doivent être les plus faibles possibles.
- Avoir une excellente résistance mécanique à haute température, de même résister aux efforts de compression et de traction, aux chocs thermiques consécutifs à des variations brutales de température.

1.2. CONSTITUTION DES FOURS ELECTRIQUES

1.2.1. LES MATERIAUX REFRACTAIRES

- Assurer de point de vue chimique une meilleure résistance aux phénomènes d'oxydation et de réduction.

- Une qualité économique : leur coût doit-être maintenu à un niveau faible et compatible avec une bonne rentabilité du four.

Toutes les qualités suscitées doivent rester aussi constantes que possibles jusqu'à la température finale du four.

1.2.1.2. DIFFERENTS TYPES DE REFRACTAIRES :

On classe les réfractaires sur la base de plusieurs propriétés :

- 1) - D'après les réfractairités (propriétés qu'ont les matériaux pour conserver la solidité mécanique à haute température).
 - a - réfractairité de 1580 - 1770 °C
 - b - réfractairité de 1770 - 2000 °C
 - c - réfractairité supérieure à 2000 °C
- 2) - D'après le type de l'oxyde contenu dans le réfractaire :
 - a - acide (SiO₂)
 - b - base (MgO, CaO)
 - c - neutre (Al₂O₃)
- 3) - D'après la composition chimico-minéralogique où les matériaux sont divisés en :
 - a - Siliceux : à base de SiO₂ (le réfractaire de silice est quartzeux)
 - b - Aluminosilicatés : à base de Al₂O₃ et SiO₂ (réfractaire de chamotte, demi-acide et très alumineuse)
 - c - Magnésiens : à base de MgO (magnésie, dolomie, forstérite, tale, spinelle)

- d' - chromiques : à base de Cr_2O_3 et MgO (chromite, chromomagnésie et magnésie - chromite)
- e - carboniques : à base de C (carboneux et graphiteux)
- f - zirconiennes : à base de ZrO_2 (Zircon, Zirconium)
- g - carbures : à base des oxydes purs des MgO , Al_2O_3 , BeO et autres.

1.2.1.3. CLASSIFICATION D'APRES LA COMPOSITION CHIMICO-MINERALOGIQUE :

1) - Les réfractaires siliceux :

Les réfractaires les plus répandus sont ceux fabriqués avec les quartzites, ils contiennent à peu près 93 % de SiO_2 (silice).

Les produits de silice sont utilisés pour la maçonnerie des fours à coke et des fours à réchauffer, pour les parties basses et les voûtes des fours Martini et électriques.

2) - Les réfractaires aluminosilicates :

Ces réfractaires contiennent plus de 30 % d'alumine (Al_2O_3) et à peu près 65 % de silice (SiO_2).

Dans ces groupes, on distingue trois classes :

- réfractaires de chamotte, ils contiennent 30 à 45 % d'Alumine.
Les matières premières utilisées sont : les argiles réfractaires et les kaolins (dont le composant principal est le minéral kaolinite $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2 - 2\text{H}_2\text{O}$).
Les produits de chamotte sont utilisés pour le revêtement des poches de coulée, pour la construction de la partie basse des fours Martin, et pour le haut fourneau
- réfractaires demi-acides (15 à 45 % de Al_2O_3)
Les matières premières utilisées sont : l'argile de 15 à 30 % de Al_2O_3 , la chamotte demi-acide et le sable.

- réfractaires très alumineux (plus de 45 % de Al_2O_3)

Ces réfractaires sont constitués par l'une des matières suivantes :

- La Bauxite
- La Gibbsite
- La Cyanite
- La Sillimanite
- L'Andalousite
- La Mullite synthétique
- Le Corindou

3) - Les réfractaires Magnésiens : On distingue 4 Groupes :

- Les réfractaires de Magnésie : contenant 90 % de MgO
 - . Ces réfractaires sont essentiellement fabriqués à base du minéral de magnésite ($MgCO_3$), ils sont utilisés pour le garnissage des parois et des soles des fours Martin, des fours électriques à arcs, des fours à réchauffer et des fours méthodiques.
- Les réfractaires de dolomie : contenant 40% CaO et 35% MgO : obtenus à partir du minéral de dolomite ($CaCO_3 - MgCO_3$)
- Les réfractaires de forstérite : contenant 55 % de MgO et 35 % SiO_2 , ils sont fabriqués à base de $MgO - SiO_2$ et sont utilisés dans les empilages des régénérateurs et dans les fours à cuire.
- Les réfractaires de talc :
Le talc naturel est le silicate hydraté du magnésium : ($MgO - 4 SiO_2 - H_2O$)
ils sont utilisés surtout pour la fabrication des briques.

4) - Les réfractaires chromiques :

Le minéral de chromite $MgO - Cr_2O_3$ est une base essentielle des réfractaires chromeux que l'on groupe en 3 types :

- Les réfractaires de chromite contenant 30 % de Cr_2O_3
ils sont fabriqués d'une masse composée de 92 à 97 % de chromite très broyée de 3 à 4 % d'argile réfractaire et de 3 à 6 % de verre à silicate.

- Les réfractaires de chromo-magnésie : contenant 30 % de CrO_3 et 24 % MgO

ils sont fabriqués d'une charge qui se compose de 50 à 60 % de chromite et de 40 à 50 % de magnésie cuite.

- Les réfractaires de Magnésie - chromite contenant 8 à 15 % de Cr_2O_3 et 65 % à 70 % de MgO , la charge utilisée lors de la fabrication se compose de 40 à 60 % de chromite et de 60 à 5 % de magnésie cuite.

- 5) - Les réfractaires carboniques contenant 30 à 92 % de carbone, la matière première utilisée pour la fabrication de ces réfractaires est :

- le coke, le graphite et l'antracite thermique

On distingue les réfractaires de coke et de graphite :

- Les réfractaires de coke : ces réfractaires sont fabriqués à partir du coke ou de l'antracite thermique avec l'addition du bitume.
- Les réfractaires de graphite : les réfractaires utilisés sont les matériaux d'argileux-graphite, la masse du réfractaire se compose de 35 % de graphite, de 30 à 45 % d'argile réfractaire et de 10 à 40 % de chamotte.

6) Les réfractaires Zirconiques :

La matière première utilisée pour la fabrication de ces réfractaires est le ZrO_2 dont la température de fusion est de 2700 °c, cependant il existe deux types de réfractaires zirconiques :

- Réfractaires zirconiques : On utilise comme matière brute le minerai de zircon contenant 80 à 99 % de ZrO_2 et des additions de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 ; la charge se compose de 94 à 96 % du minerai de zircon moulu et de 4 à 5 % de la chaux.
- Réfractaires de zircon : ils contiennent de 59 à 63 % de ZrO_2 et 32 à 34 % de SiO_2 .

7) - Les réfractaires de carbures :

Ce sont les réfractaires qui se composent des combinaisons chimiques des métaux avec le carbone. Ces réfractaires sont caractérisés par de hautes températures de fusion dont voici quelques exemples :

ZrC : 3530 °C	TaC : 3800 °C
NbC : 3500 °C	WcC : 2600 °C
TiC : 3140 °C	ThC : 2625 °C

8) Autres réfractaires : Produits spéciaux

Ces réfractaires sont utilisés dans le domaine industriel tels que :

- Les coulis : pour le maçonnerie et la garniture des briques réfractaires.
- Les ciments de joints : utilisés à haute température.
- Les enduits : pour la protection des surfaces des briques réfractaires.
- Les mélanges réfractaires plastiques : utilisés comme produits de réparation.

Caractéristiques de quelques réfractaires couramment utilisés :

(voir Annexe)

1.2.1.4 LES ISOLANTS THERMIQUES :

Les parois des fours électriques comportent au moins une partie d'isolant thermique ; ces matériaux, utilisés en face froide des fours assurent l'isolation thermique, c'est à dire réduire les déperditions thermiques, la conductivité thermique de ces produits doit donc être très faible.

Les isolants thermiques présentent des structures cellulaire, poreuse ou fibreuse.

Classification des matériaux isolants suivants leurs températures maximales d'utilisation, et caractéristiques moyennes de quelques éléments sont présentées dans l'annexe.

1.2.1.5 LES PRODUITS REFRACTAIRES ISOLANTS :

Les produits réfractaires isolants ont les mêmes propriétés physiques et mécaniques que les réfractaires ; ils doivent présenter une excellente tenue en température et une résistance mécanique à chaud, comme ils doivent présenter un grand pouvoir isolant afin de réduire au maximum les déperditions thermiques.

Les réfractaires isolants sont réalisés à partir des matières premières utilisées pour la fabrication des réfractaires : Argile, Alumine, Silice... mais devront avoir une porosité d'au moins 45 %, c'est à dire une faible conduction thermique et une capacité thermique réduite, ce sont les caractéristiques des isolants.

On classe les réfractaires isolants en quatre groupes :

- 1 - Les réfractaires isolants façonnés (briques, pièces de formes)
- 2 - Les bétons réfractaires isolants rigides
- 3 - Les réfractaires isolants fibreux
- 4 - Les bétons isolants fibreux et les produits fibreux composites.

Parmi ces produits, les réfractaires isolants fibreux méritent une mention particulière, leur conductivité thermique étant de 20 à 40 % plus faible que celle des autres réfractaires isolants comme les briques ou béton, et leur densité 5 à 10 fois plus petite.

La plus grande partie des réfractaires fibreux céramiques est constituée de mélange de silice et d'Alumine fondue au four électrique à arc.

Les matériaux fibreux se présentent sous forme de fibre en vrac, en nappes, de feutres, de cordons, de papiers, de matériaux composites (bétons, pièces de formes).

Les caractéristiques de quelques réfractaires isolants sont cités dans l'Annexe.

1.2.2. SYSTEME DE REGULATION

1.2.2.1. GENERALITES :

La régulation ne concernait, il y a peu de temps encore, qu'un petit nombre de spécialistes, qui s'ingéniaient à parfaire des réglages, aux fins d'obtenir le meilleur rendement et une sécurité optimale dans le fonctionnement des systèmes complexes telles que l'Industrie Lourde, les Acieries.

Il faut tout d'abord définir les buts de la régulation :

Celle-ci, permet de maintenir une grandeur quelconque à une valeur choisie, quelque que soient les influences extérieures. Pour bien régler les diverses grandeurs, il faut au préalable bien savoir les mesurer, c'est le cas des températures, débit, pressions, niveaux, grandeurs électriques

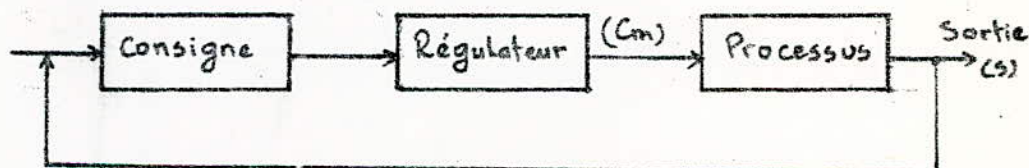


Figure n° 5 Réglage d'un processus

1.2.2.2. FACTEURS CARACTERISTIQUES

On distingue dans toute installation, trois facteurs caractéristiques :

- Facteur à régler, c'est la grandeur que l'on veut maintenir à une valeur choisie appelée : valeur de réglage ou point de consigne.
- Facteur perturbateur : c'est une grandeur sur laquelle on ne peut influer et dont les variations provoquent le déséquilibre : mesure consigne.
- Facteur de réglage : c'est une grandeur sur laquelle on agit pour rétablir le facteur réglé à sa position de consigne.

1.2.2.3. ANALYSE DES OPERATIONS

Nous pouvons présenter une installation de régulation automatique suivant trois points importants :

- La mesure : qui se présente au capteur de température. Ce capteur est sensible aux variations de la grandeur à régler et émet un signal proportionnel.
- Comparaison : le régulateur compare la mesure à la consigne (repère) et émet un signal de commande fonction de la différence.
- Commande et action : le relais agit sur l'organe réglant.

La commande et l'action sont parfois des fonctions effectuées par un seul appareil.

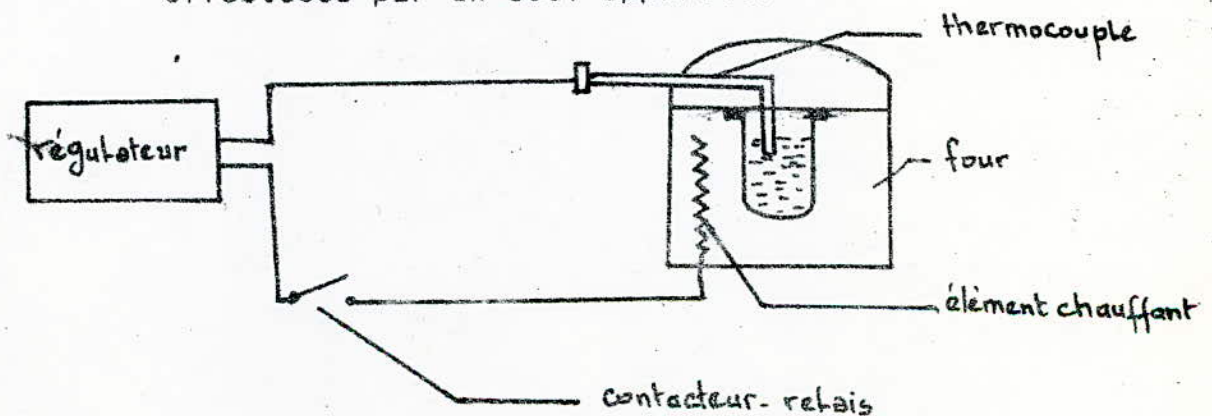


Figure n° 6 explicative d'un système de régulation

1.2.2.4. TYPES DE REGULATEURS :

Les régulateurs généralement utilisés sont du type classique ayant une erreur de statisme (amplitude de variation) de la température à régler. Cette erreur est généralement comprise entre 0,1 % et 0,5 % suivant la valeur réglée.

Une variation dans les réglages à différentes actions, vise une meilleure précision sur la consigne :

1) - Réglage par action tout ou rien ou "TOR"

Cette action est utilisée dans le cas simple de régulation, ne nécessitant pas une grande stabilisation de la régulation. Ce système de régulation présente l'avantage d'être très simple et permet d'utiliser des régulations relativement économiques.

2) - Réglage par action proportionnelle "P"

Cette action tend à corriger de manière instantanée donc rapide tout écart de la grandeur réglée.

3) - Réglage par action intégrale "I"

Elle complète l'effet de l'action proportionnelle en annulant l'écart résiduel en régime permanent.

4) - Réglage par action dérivée "D"

Dans le cas d'une installation pouvant être fortement perturbée, ou de grande inertie, on est conduit à utiliser l'action dérivée, qui tient compte de la vitesse de variation de la grandeur à régler et dont le signal de sortie est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart.

A partir des actions P,I,D, on peut constituer des régulateurs plus performants tels : PI ; PD ; PID.

- Le régulateur à action "PI", a les avantages d'une annulation de l'erreur permanent et un temps de réponse faible.

La commande Cm (Figure n° 4) tend à compenser le décalage entre la sortie et la valeur de consigne d'une façon d'autant plus prononcée que l'écart dure plus longtemps.

- Le régulateur à action "PID" : permet à la fois, de venir rapidement à la consigne sans la dépasser et en même temps de stabiliser le système.

Ce type de régulation n'est utilisé que lorsque l'on recherche une très grande précision de réglage, cependant le prix étant élevé, la mise au point présente des difficultés, le dosage de chaque action est complexe.

1.2.3. LES CAPTEURS DE TEMPERATURE :

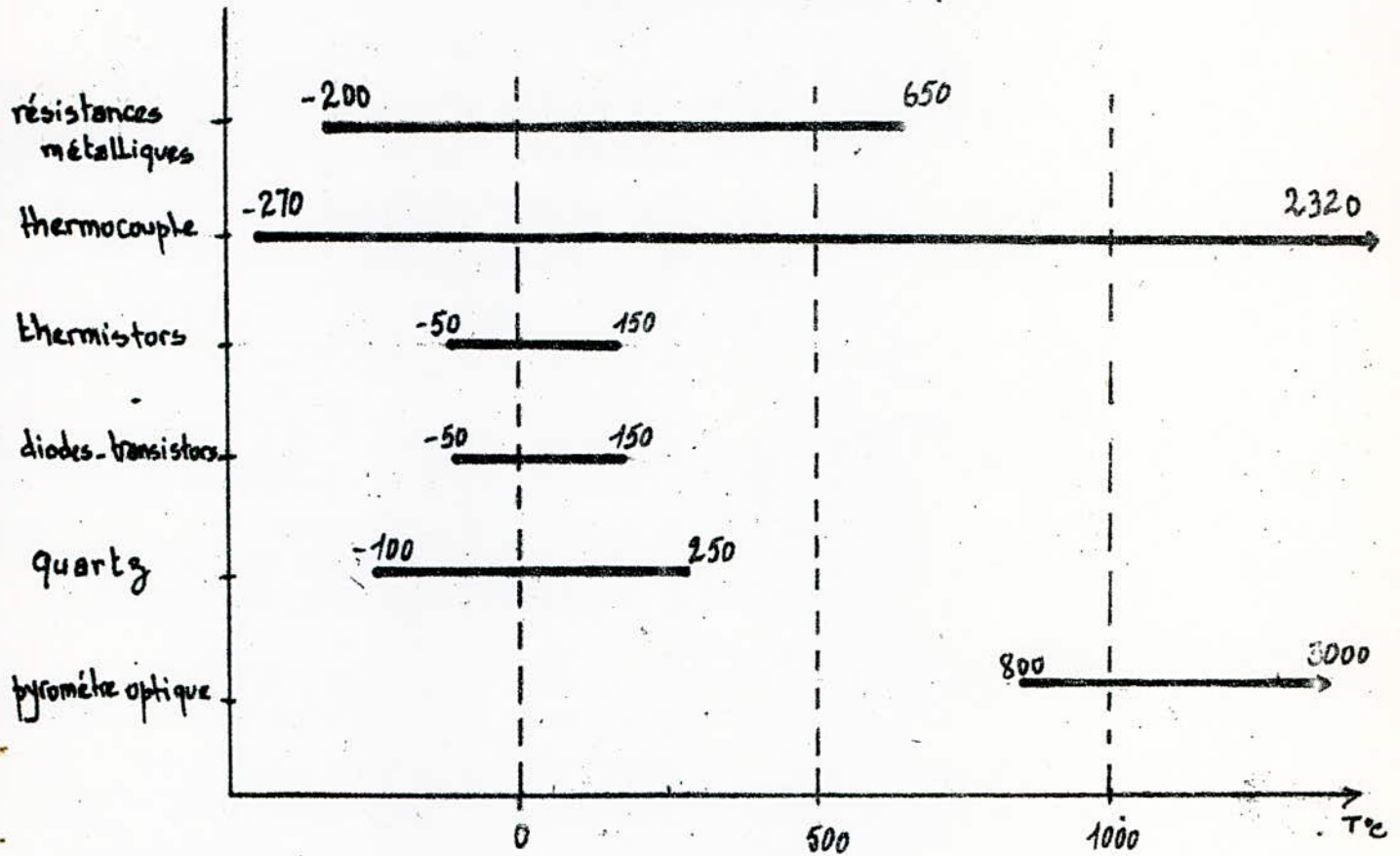
1.2.3.1. INTRODUCTION :

Dans toute les grandeurs physiques, la température est certainement l'une de celles dont la mesure est la plus fréquente, la température détermine, en effet, de façon décisive, les propriétés de la matière, c'est pourquoi on recherche dans l'industrie la mesure précise et le contrôle très strict des températures sont indispensables, la température peut-être mesurée par plusieurs types de capteurs ; les principaux capteurs utilisés à l'échelle industrielle sont :

- Les résistances métalliques
- Les thermo couples
- Les thermistances
- Les diodes, transistors
- Quartz
- Pyromètre optique.

La gamme de températures des principaux capteurs thermiques est illustrée dans le diagramme

Ci-dessous Figure n°7



- Remarques :

- . Aucun conducteur ne couvre à lui seul toute la gamme possible des températures donc la coexistence de ce grand nombre de capteur nous permet de choisir l'appareil de mesure selon la température d'utilisation.
- . Les Thermocouples sont utilisés dans un domaine vaste et à une température élevée.
- . Les résistances métalliques et les thermocouples sont des capteurs précis, mais ils sont relativement coûteux.
- . Les capteurs à quartz peuvent atteindre une excellente résolution au voisinage de la température ambiante ; les capteurs à quartz sont très onéreux.

1.2.3.2. DEFINITIONS DE QUELQUES CAPTEURS

1) - Capteurs à résistance métallique :

Ils sont basés sur la variation de la résistance électrique des matériaux en fonction de la température, les matériaux utilisés en général pour la fabrication de ces capteurs sont :

le Constantan (55 % Cu ; 45 % Ni) ;
Cuivre, Nickel, Maganin (86 % Cu, 12 % Mu ; 2 % Ni)
platine tungstan.

2) - Thermistances (ou Thermistors) :

Ce sont des résistances fabriquées par frittage d'oxydes semi-conducteurs de Fer, de Cobalt, de Nickel, de Chrome et de Manganèse, elles sont réalisées sous formes de perles, de disques ou de batonnets.

3) - Diodes-Transistors :

Les composantes utilisées, diodes ou transistors au silicium montées en diodes (base et collecteurs reliés), sont alimentées dans le sens direct à courant constant, la tension V à leurs bornes, qui est fonction de la température, peut donc être la grandeur électrique de sortie du capteur de température qu'ils constituent.

4) - Capteurs de température à quartz :

Les quartz utilisés comme étalon de fréquence sont taillés selon une coupe qui minimise la variation de fréquence en fonction de la température, on peut adapter une démarche inverse en choisissant une coupe de cristal correspondant) une sensibilité élevée de la fréquence de résonance en fonction de la température, ainsi on réalise des capteurs de température qui peuvent travailler dans une plage allant de -100°C à 250°C .

5) - Pyromètres Optiques :

Les corps chauffés à haute température émettent des ondes électromagnétiques (des radiations infrarouges), le quotient de l'énergie rayonnée et de la surface émettrice est appelée émittance ; l'émittance d'un corps qui a la propriété d'absorber la totalité de l'énergie rayonnée qu'il reçoit (corps noir) est proportionnelle à T^4 (propriétés de STEFAN BOLTZMANN).

Deux pyromètres sont particulièrement employés :

- Pyromètre monochromatique à disparition de filament : un système optique donne une image de la source (corps dont la température est à mesurer) en un point où se trouve le filament d'une lampe la température de ce dernier est réglée en agissant sur l'intensité du courant qui le parcourt jusqu'à ce que le filament semble disparaître car il se confond avec l'image de la source. L'Ampermètre placé en série avec la lampe est directement graduée en température.
- Pyromètre de Fery : il comprend un couple thermo-électrique dont la soudure chaude est chauffée au moyen du rayonnement émis par le corps noir, un galvanomètre relié à ce couple donne directement la température du corps noir.

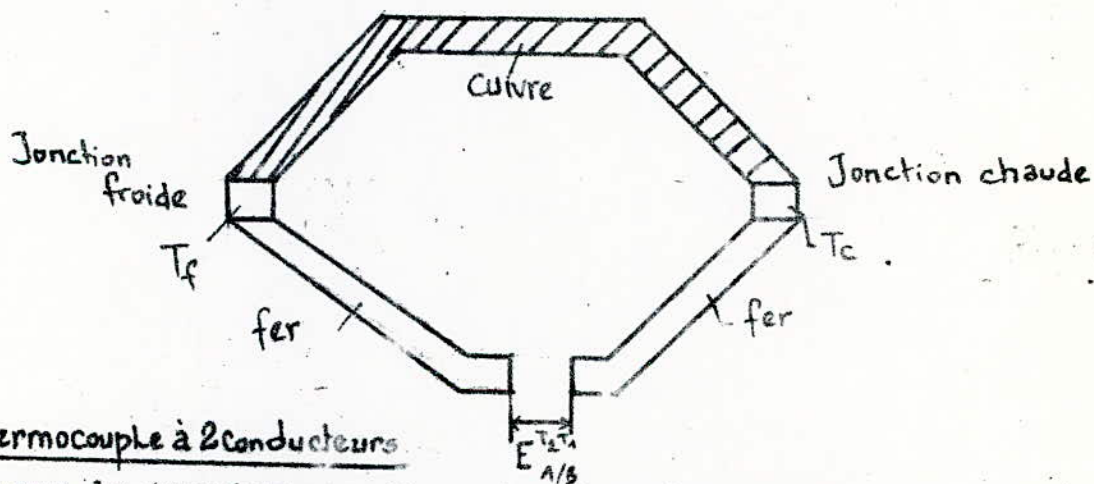
6) - Thermomètre à mercure :

En prenant comme grandeur physique le volume apparent du mercure dans son enveloppe, on peut déterminer la température du corps chauffé grâce à une échelle linéaire centesimale de température établie dans ce sens (mesure de la température).

7) - Thermocouple :

(Ce genre de capteur est le plus utilisé dans le cas des fours électriques) ; le thermocouple est un circuit électrique fermé constitué par deux conducteurs A et B de nature différente, reliés entre eux par deux jonctions ou soudures aux températures T_1 et T_2 ; ainsi il délivre une force électromotrice

E qui dépend d'une part de la nature des conducteurs et d'autre part, des températures T_1 et T_2 , une des températures est généralement connue, c'est la température de référence (elle est fixe) l'autre est la température T_e qu'elle atteint lorsqu'elle est placée dans le milieu étudié.



8 Thermocouple à 2 conducteurs

Lorsque la température d'une des jonctions est maintenue constante, la tension de sortie du thermocouple varie selon une loi complexe et qui est souvent une parabole (loi de GAUGAIN)

Voir figure n° 9 ci-dessous.

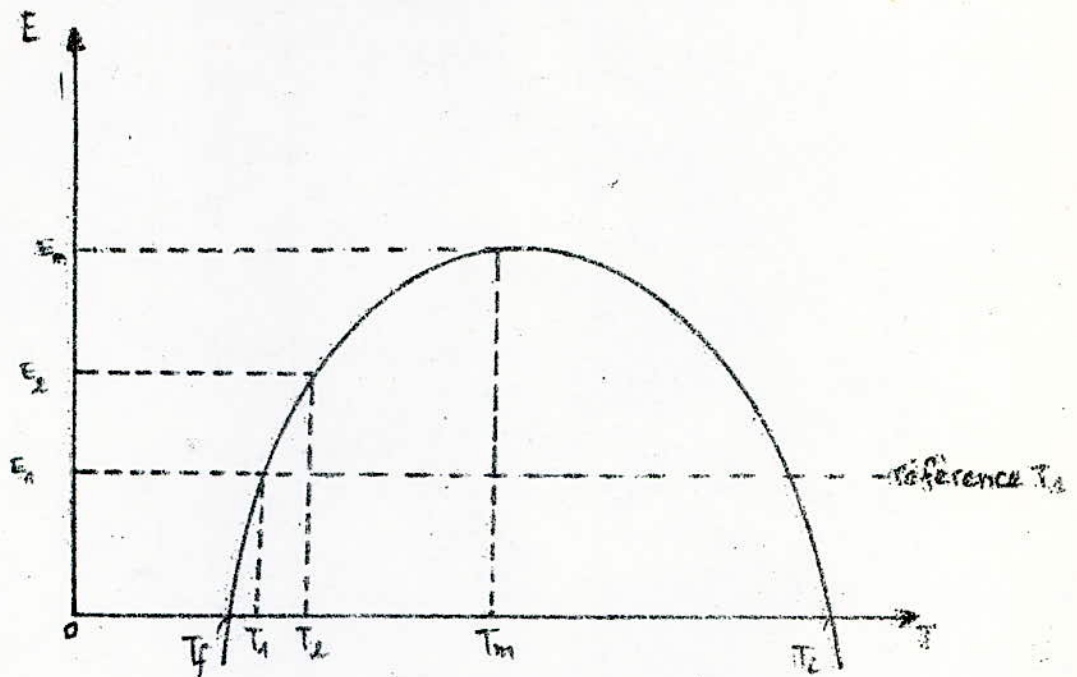


fig. n° 9 variation de La tension de sortie du thermocouple
(Loi de GAUGAIN)

La tension de sortie passe par un maximum pour une température T_m qui est caractéristique du matériau, et elle s'annule à la température d'inversion T_i qui est symétrique de la température de référence T_r par rapport à T_m .

- Les Principaux thermocouples : les thermocouples sont réalisés à l'aide de deux fils électriques de différente composition chimique, les principaux thermocouples sont normalisés et ils sont désignés par les lettres T, J, K, E, S, R, B.

Les caractéristiques de ces thermocouples sont présentés dans le tableau suivant :

THERMOCOUPLE	TYPE	x à 0°C (v/ °C)	PLAGE DE TEMPE- RATURE	TENSION DE SORTIE	PRECISION
Cu/constantan 1,63 mm	T	41	-270 à 370	-6,258 à 19,027	+2% de 100 à 400 °C +8% de 40 à 100 °C +0,75% de 100 à 350 °C
Fe/constantan 3,25 mm	J	52	-210 à 800	-8,096 à 45,498	+3% de 0 à 400 °C +0,75 de 400 à 800 °C
Chromel/Alumel 3,25 mm	K	40	-270 à 1250	-5,354 à 50,633	+3% de 0 à 400 °C +0,75% de 400 à 1250
Cromel/ Constantan 3,25 mm	E	62	-270 à 870	-9,835 à 50,633	+3% de 0 à 400 °C +0,75 de 400 à 870
Pt/Pt-Rhodium 0,5mm	S	6,4	-50 à 1500	-0,236 à 15,576	+2,5% de 0 à 600 +0,4 % de 600 à 1500 °C
Pt/Pt-Rhodium 13% 0,5 mm	R	7	-50 à 1500	-0,266 à 17,445	+1,4% de 0 à 538 °C de 538 à 1500 °C
Pt-Rh 6%/ Pt-Rh 13 % 0,5 mm	B	6	0 à 1700	0 à 12,426	+ 0,5 de 870 à 1700 °C
W -Rhénium 5% W -Rhénium 26%	--	--	0 à 2700	0 à 38,45	--

- REMARQUES :

- Les thermocouples en platines et un alliage de platine et Rhodium se caractérisent par une bonne linéarité, une excellente stabilité et une bonne tenue aux températures élevées (1700 °C), ils ont par contre, un faible coefficient de température (6 à 7 v/°C) (le coefficient de température permet de déterminer la tension de sortie).

Pour les températures autres que la température de référence 0 °C :

$$E_s = \alpha (T_c - T_f) \quad (32) \quad (\text{Tension de sortie})$$

- Pour les usages courants, on préfère utiliser des thermocouples fer/constantan, Cu/constantan, chromel (90 % Ni, 10% Cr) /Alumel (94 % Ni, 2% Al, 3% Mu, 1% Si) ou chromel/constantan, qui sont moins coûteux et qui ont des coefficients de températures plus élevés (40 à 60 v/°C).
- La jonction chaude du thermocouple est habituellement disposée dans une première gaine isolante et l'ensemble est logé dans une gaine métallique de protection en forme de canne.
- La table des tensions de sortie des thermocouples en fonction de la température est présentée à l'Annexe.

1.2.4. LES RESISTANCES ELECTRIQUES

1.2.4.1. INTRODUCTION

Le développement du chauffage par résistance électrique est dû à l'amélioration continue des matériaux destinés à la fabrication d'éléments chauffants. Cette amélioration ne se situe pas, uniquement sur l'élévation du point de fusion, mais aussi, sur les résistances aux agressions chimiques, et plus particulièrement l'oxydation et, sur les résistances physiques auxquelles ils peuvent-être soumis.

4.2. CRITERES DE CHOIX DES RESISTANCES :

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

Parmi les critères de choix de résistances on peut citer :

- La température maximale de fonctionnement ; celle-ci est liée à la température de fusion du matériau constituant la résistance, et elle conditionne d'autre part les matériaux de la charge utilisée, devrait-être nettement inférieure à la température de fusion.
- La résistance des éléments chauffants doit-être élevée pour permettre une dissipation importante de la chaleur.
- L'élément chauffant doit avoir un coefficient de température faible pour éviter les variations brusques de la résistance électrique pendant l'échauffement.
- Une bonne malléabilité est exigée pour une meilleure fabrication et une mise en forme acceptable.
- Les matériaux des résistances ne doivent pas subir des transformations de phases qui engendrent des phénomènes de vieillissement.
- Une bonne tenue à la corrosion et particulièrement à l'oxydation est exigée.
- Un faible coefficient de dilatation entrain une bonne résistance mécanique.
- A puissance constante, une résistivité relativement élevée, permet à tension donnée, de réduire les dimensions du corps de chauffe et, pour des dimensions fixées, de limiter l'intensité ;

Il est bien sûr difficile de trouver l'ensemble de ces qualités réunies dans un seul matériau, mais plusieurs familles se rapprochent plus au moins de ce profil idéal et permettent de satisfaire la quasi totalité des besoins industriels.

1.2.4.3. LES DIFFERENTS TYPES DE RESISTANCES :

Les éléments chauffants sont classés en trois familles :

- Les résistances métalliques
 - Les cermets
 - Les résistances non métalliques
- selon leurs températures d'emploi, les résistances sont classées comme suit :

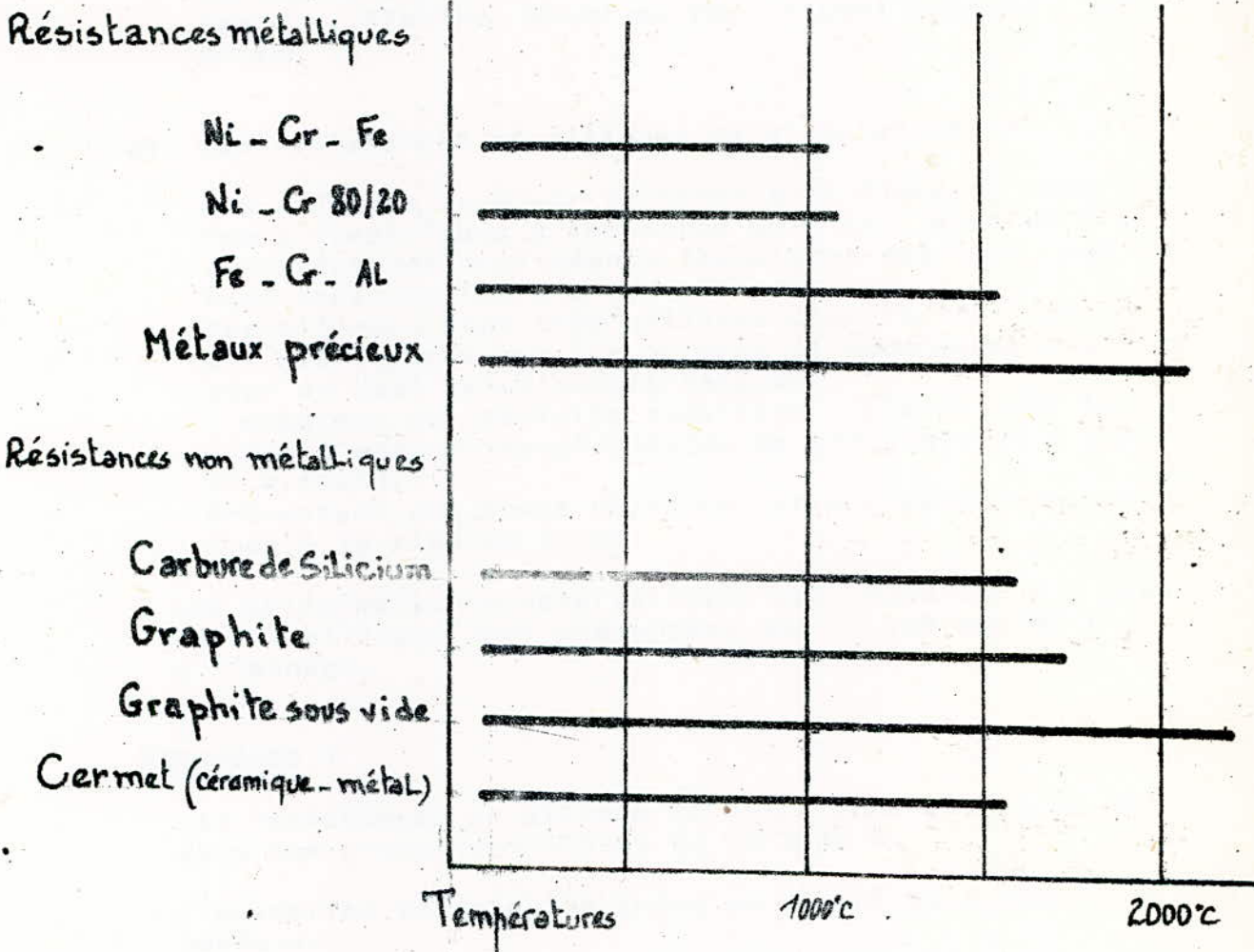


Figure n° 10 : Température d'emploi de quelques matériaux utilisés comme résistances

- Les résistances en alliages Ni-Cr sont souvent appelées les 80/20 et les 70/30 (80 % de Ni, 20 % Cr et 70 % Ni et 30 % Cr), ces alliages contiennent en plus 2 % d'autres métaux tels que Mn, Mg (facilitant le laminage et le tréfilage) ; Si (désoxydant). Ces résistances présentent une excellente résistance à l'oxydation et atteignent des températures plus élevées que les alliages Ni-Cr, et ont une meilleure résistance mécanique.
- La température limite d'emploi est de 1000 °C pour les 80/20 et 1150 °C pour les 70/30.
- Les résistances ont une durée de vie très grande (10 ans).

Pour les températures supérieures à 1100 °C on utilise les résistances au Kanthal (nom commercial d'un alliage réfractaire de Fe-Cr-Co-Al). Ces résistances sont maintenant largement utilisées dans tous les modèles de fours électriques, cependant le kanthal présente l'inconvénient d'être très mou aux hautes températures et très cassant à froid.

Voir le tableau des caractéristiques N° () à l'Annexe.

b) Les résistances en alliage Fe-Cr-Al

Ces alliages contiennent de 20 à 30 % de chrome, de 2 à 6 % d'aluminium le reste étant le fer et quelques additions en faibles proportions. Les principaux alliages Fe-Cr-Al utilisés comme résistances et leurs caractéristiques principales sont tabulées à la figure () en Annexe.

Contrairement aux alliages Ni-Cr, les alliages Fe-Al ont une résistance mécanique moins élevée et sont assez fragiles à froid après plusieurs utilisations, leur durée de vie est deux fois moins importante que les alliages Ni-Cr. Ces résistances sont utilisées à des températures variant entre 1250 et 1350 °C.

c) Les résistances spéciales :

Résistances en alliage Fe-Ni-Cr-Al :

Ces résistances sont d'apparition très récente, leur composition approximative : 5% Al, 35 % Ni ; 20 % Cr le reste étant du fer et de faibles additions d'autres métaux.

Les résistances présentent une excellente résistance à l'oxydation et atteignent des températures plus élevées que les alliages Ni-Cr, et ont une meilleure résistance mécanique.

- Résistances en métaux et alliages spéciaux :
Ces résistances sont caractérisées par un haut point de fusion, mais leur coût est très élevé, ce qui pousse leur utilisation dans des domaines bien spécifiques.
- Résistances en Pt, Platine rhodié et rhodium :
Les caractéristiques principales de ces métaux sont indiquées sur le tableau n° () en Annexe.

Malgré qu'elles atteignent des températures très élevées, ces résistances tendent à disparaître vu le coût très élevé du platine, d'autant plus que des résistances moins chères (en bisiliciure de molybdène par exemple) atteignent des températures aussi élevées.

- Résistances en Mo, W, Ta, Nb
Les caractéristiques principales de ces métaux sont données dans le tableau n° () en Annexe.
Ces métaux sont généralement utilisés comme éléments chauffants dans des fours sous vides ou sous atmosphères contrôlées.
Leur température d'utilisation est élevée (1500 °C à 2000 °C).

2) Les Cermets :

Le terme Cermet est une abréviation de l'expression "Céramique-métal". Les Cermets sont des résistances composées de métaux et métalloïde se présentant sous forme de céramiques frittées à haute température. Le matériau de base est le bisiliciure de Molybdène MoSi₂ à 95% pour le type usuel ; d'autres résistances en chromite de lanthane et en zircone sont apparues récemment, mais leur utilisation reste confiée à des applications spéciales.

- Les résistances en bisiliciure de Molybdène

CARACTERISTIQUES	BISILICIURE DE MOLYBDENE
DENSITE	ENVIRON 5,6
COEFFICIENT DE DILATATION/°C	$7,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
RESISTIVITE	35 à 20°C ÷ 350 à 1500 °C
TEMPERATURE D'EMPLOI °C	1700 ÷ 1800 °C

Les éléments en MoSi₂ ne sont pas adaptés au chauffage des fours sous-vide poussé, leur durée de vie est de l'ordre de 10 ans. Ce type de résistance est réservé aux fours fonctionnant à haute température:

- . L'industrie céramique pour la fabrication des matériaux réfractaires de porcelaine, de céramique spéciale
 - . L'industrie des métaux pour la construction des fours pits, fours de traitements thermiques..
 - . L'industrie de verre
 - . Fours de laboratoires
- Les résistances en chromite de lanthane :
- Ces résistances sont constituées d'un mélange d'oxyde de chrome et d'oxyde de lanthane (chromite de lanthane) et d'autres composés en faible quantité. Le point de fusion de ce composé est de l'ordre de 2500°C, la limite d'emploi est de 1850 °C environ, et sa durée de vie est très faible (quelques centaines d'heures au maximum).
- Les résistances de Zircone :
- Ces résistances sont en céramique frittée et sont sous la forme de tube ou de baguette comprenant une partie chauffage en Zircone ZrO₂ et des sorties froides de chromite de lanthane. La température d'emploi peut atteindre les 2200 °C en atmosphère oxydante.

3) Les résistances non métalliques :

Ces résistances se composent essentiellement des éléments chauffants en carbone et en carbure de silicium.

- Les résistances en carbone :
Le carbone est utilisé sous deux formes allotropiques :
 - . Le carbone amorphe
 - . Le carbone synthétique

Les caractéristiques des résistances en carbone sont présentées sur le tableau N° () en Annexe.
Les résistances en graphite synthétiques sont souvent utilisées, car ce dernier présente une résistivité qui est pratiquement constante et une meilleure résistance à l'oxydation ; par contre le carbone amorphe s'oxyde à l'air à partir de 500 °C.

- Les résistances en carbure de silicium :
Ces résistances sont inventées pour remédier à l'inconvénient des résistances en carbone : l'oxydation rapide à l'air ; le carbure de silicium très pur présente une bonne résistance à l'oxydation.
Le carbure de silicium utilisé pour la fabrication des éléments chauffants présente les caractéristiques suivantes :

CARACTERISTIQUES	CARBURE DE SILICIUM
DENSITE	2,6
RESISTIVITE	0,15 et 0,5 Ω cm à 20 °C -6 -6
COEFFICIENT DE DILATATION	5.10 +6.10 /°C entre 20 et 1500 °C
TEMPERATURE D'EMPLOI	1500 ÷ 1600 °C

1.2.4.4. FORMES ET DISPOSITIONS DES RESISTANCES DANS LES FOURS :

Les résistances se présentent sous diverses formes : fils, tiges, bandes baguettes, ..., et leur disposition dans les fours demande des formes géométriques très variées dont voici quelques modèles :

Les éléments chauffants sont soit groupés en batteries formes de résistances en bandes figure (A) ou en fils figure (B) supportées par des supports réfractaires.

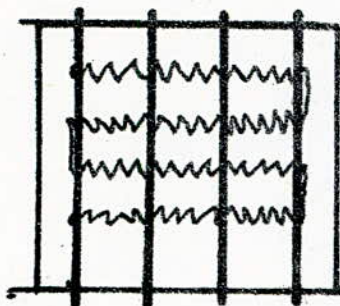


FIGURE (A)
RESISTANCES EN BANDES

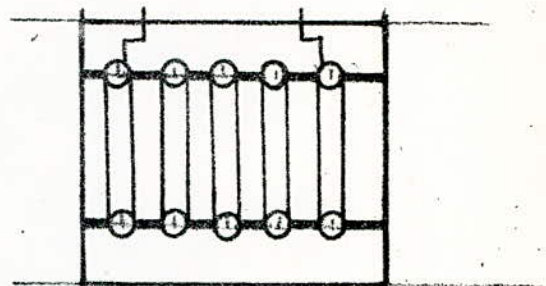


FIGURE (B)
RESISTANCES EN FILS

BATTERIES D'ELEMENTS CHAUFFANTS

SOIT EMPLOYES SOUS FORME DE RESISTANCES BOUDINEES FIGURES (C);(D);(E)

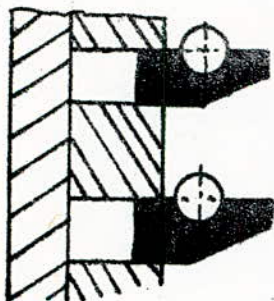


FIGURE (C) SUPPORTEES
PAR DES BRIQUES
DE FORME EN PIEDS DROITS

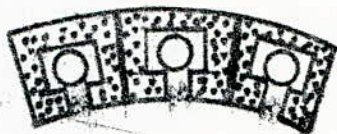


FIGURE (D) PLACEES
EN VOUTE

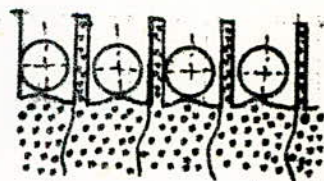


FIGURE (E)
PLACÉE EN SOLE

Soit sous d'autres formes dont la forme géométrique est variée de celles sus-citées.

figure N° 11: formes et dispositions des résistances dans les fours

1.2.4.5. CALCUL DES RESISTANCES

Le calcul des résistances est basé sur deux relations traduisant l'échange thermique entre les éléments chauffants, la charge et les parois d'une part, la puissance dissipée dans les résistances d'autre part. Si les résistances travaillent essentiellement par rayonnement, le flux thermique échangé entre les éléments chauffants et la charge est de la forme (d'après la loi de STEFAN-BOLTZMANN) (voir chapitre I, 1.1.3):

$$\Phi = \epsilon_{rc} \times F \times \sigma (T_R^4 - T_c^4) \quad [W/m^2] \quad (33)$$

ou ϵ_{rc} : coefficient < 1 dépendant des émissivités ϵ_r et ϵ_c des résistances et de la charge.

F : facteur de forme globale < 1 tenant compte du remplissage de la paroi en résistances et de leur orientation par rapport à la charge.

σ : constante de Stefan : $5,37 \cdot 10^{-8} \quad [W/m^2 K]$

T_R et T_c : température des résistances et de la charge en K.

La loi de Joule s'exprime sous la forme :

$$P_w = \frac{U^2}{R} \quad [W] \quad (34) \quad \begin{array}{l} U : \text{en volts} \\ R : \text{en ohms.mètres} \end{array}$$

à l'équilibre thermique toute la puissance électrique dissipée doit se trouver dans le flux thermique émis par la résistance :

$$P_w = \Phi \cdot S = \frac{U^2}{R} \quad (35) \quad \text{où } S = \text{Surface rayonnante externe de l'élément chauffant}$$

1.3 LES DIFFERENTS FOURS A FUSION:

Les fours électriques sont d'un emploi universel dans l'industrie vu, l'absence de fumées et de bruits, qui améliorent les conditions de travail et préservent la propreté des locaux. On a tendance ainsi à minimiser l'utilisation des fours à combustion.

Pour le cas des fours utilisés dans les laboratoires. Nous remarquons que, non seulement le four électrique est transportable et peut-être installé presque partout, il est aussi d'un emploi facile, il ne demande aucune connaissance particulière.

- Nous allons citer ainsi quelques types de fours à fusion électriques et à combustibles.

1.3.1. LES FOURS A COMBUSTIBLES

1.3.1.1. FOURS DE FUSION A SOLE :

Le chauffage dans ce type de four se fait à gaz, la charge immobile sur une sole en forme de cuvette est chauffée jusqu'à la fusion par le flux de la chaleur reçu par sa surface, par rayonnement.

1.3.1.2. FOURS DE FUSION DES METAUX LEGERES :

Ces fours sont chauffés au fuel-oil, au gaz de gazogène (issu du coke sec) comme il est nécessaire au travail du métal que celui-ci soit complètement exempt d'hydrogène on doit produire le gaz le plus sec possible et le plus pauvre possible en hydrogène à partir du coke sec.

1.3.1.3. FOURS TOURNANTS :

Ces fours ont une forme cylindrique et tournent autour de leur axe qui est pour les fours à fusion généralement horizontal. Dans le cas de haute température de travail, ces fours, dont la carcasse est en acier, sont maçonnés ou constitués d'un pisé damé (produit réfractaire constitué d'Argile, d'Alumine et de Silice).

1.3.2. LES FOURS A FUSION A RESISTANCES

Ces types de fours sont généralement utilisés dans l'industrie et cela pour la fusion des métaux et spécialement les non ferreux.

Nous citerons ci-dessous quelques types de fours à fusion:

1.3.2.1. LES FOURS A BAGUETTES RAYONNANTES :

Ces fours sont utilisés dans les fonderies de moulage, pour l'élaboration des fontes et d'aciers spéciaux et quelques rares alliages cuivreux. Ils ont une forme cylindrique montée sur des rouleaux permettant un mouvement de rotation. L'élément chauffant est constitué par un barreau de graphite ou de carbure de silicium qui rayonne sur la charge et sur les réfractaires du four. L'utilisation de ces fours commencent à disparaître de plus en plus, pour laisser la place aux fours à induction à creuset qui présentent plus de facilité d'exploitation.

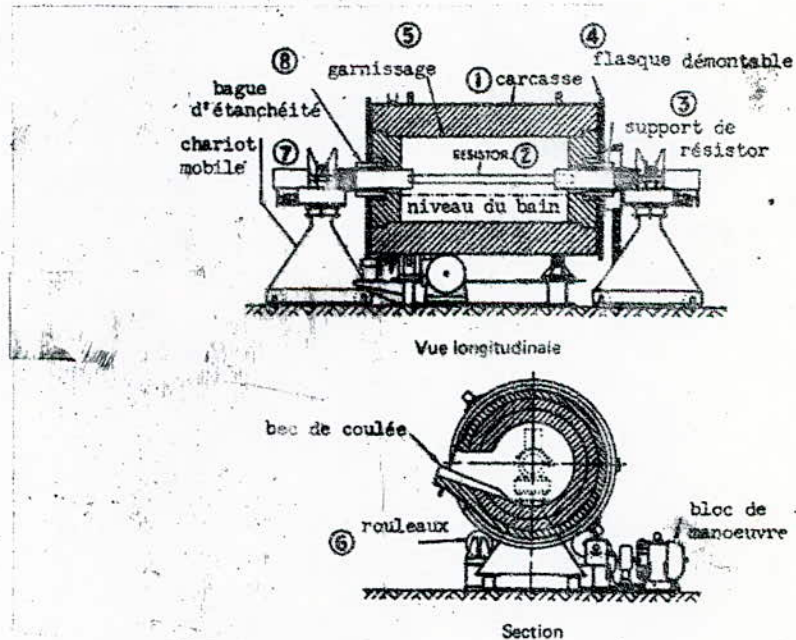


FIGURE N° 11 FOUR A BAGUETTES RAYONNANTES

1.3.2.2. LES FOURS A BASSIN :

Ces fours sont essentiellement utilisés dans les fonderies de moulage, pour la fusion et le maintien des alliages d'aluminium et des alliages à bas point de fusion (Zamak et autres alliages de Zinc, Etain, Plomb).

Les éléments chauffants utilisés sont très divers (voir chapitre I, 1.2.4.) sont placés en voûte de telle façon qu'ils rayonnent directement sur la charge. Ils peuvent être métalliques, constitués de résistances moulées, ou de fils enroulés sur des tubes de sillimanite, ou non métallique telle les baguettes de carbures de Silicium. Vu la capacité importante de ces fours, ils permettent de faire fondre une proportion élevée du métal. Mais en revanche, les fours manquent de souplesse car le changement d'alliages à fusionner nécessitent un temps important (figure N° 11).

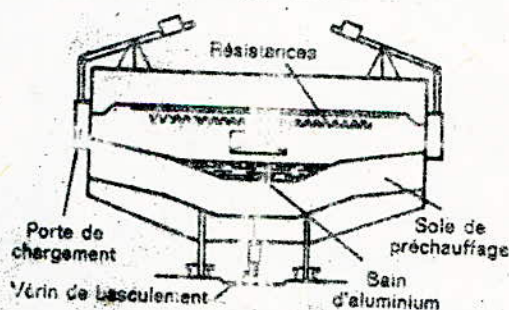


FIGURE N° 11 FOURS A BASSIN

1.3.2.3. LES FOURS A CREUSET

Suivant l'utilisation, les fours à creuset sont fixes ou basculant.

Le métal est placé à l'intérieur d'un creuset qui est en graphite pour les alliages d'aluminium, en graphite ou en carbure de silicium pour les alliages cuivreux, en acier pour les alliages de magnésium, en fonte pour les alliages de zinc. Ce creuset est placé dans une enceinte enroulée de résistances. Ces résistances sont généralement métalliques (Ni-Cr, Fe-Cr-Al) et cela à des températures variant entre 1100 - 1150 °C. Au delà de ces températures on utilise généralement les résistances au KANTHAL A-1 correspondant à une température de service 1310 °C, ou des résistances non métalliques ou des cermets (voir chapitre I, 1-2-4).

Ces fours permettent d'effectuer des fusions sous vide ou sous atmosphère contrôlée. Ils présentent un intérêt important par rapport aux fours à combustibles et cela sur le point de la consommation d'énergie et sur la durée de vie du creuset qui varie de 20 à 50 % plus, par rapport aux fours à combustibles (figure n° 12).

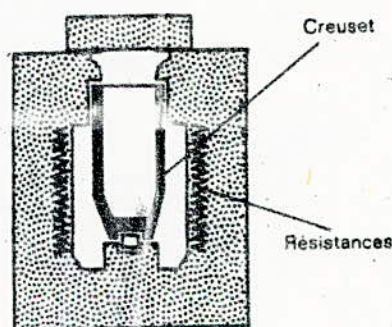


fig N°12 four à creuset

1.3.3. CHAUFFAGE PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

Le chauffage par induction électromagnétique consiste à l'emplacement d'un conducteur dans un champ magnétique variable. Ce conducteur d'électricité s'échauffe par effet Joule quand il est parcouru par un courant électrique.

On considère deux types importants de fours à fusion :

1.3.3.1. LES FOURS A INDUCTION A CREUSET :

Le creuset de ce four est constitué d'un garnissage réfractaire en pisé damé et qui peut-être remplacé par un creuset en graphite ou en métal. Le creuset est entouré par une bobine inductrice refroidie par circulation d'eau. Ce type de four peut atteindre des températures considérables.

Pour des alliages légers tels l'aluminium et magnésium, les fours à induction à creuset basse fréquence, sont largement utilisés. Pour les cas de l'aluminium, on commence à utiliser les fours à induction à moyenne fréquence car les charges sont plus compactes et le démarrage sur charge froide, facilité.

Pour le magnésium, les fours à basse fréquence sont d'une utilisation fréquente, mais il est indispensable de placer un creuset en acier au lieu du garnissage réfractaire pour éviter la réaction du métal sur le réfractaire.

Ces fours sont utilisés pour la fusion de tout types de métaux, et cela à basse, moyenne ou haute fréquence.

1.3.3.2. LES FOURS A INDUCTION A CANAL :

Ces fours sont destinés à la fusion et plus spécialement au maintien du métal fondu.

Le four est constitué d'un réservoir ou creuset débouchant sur les deux extrémités du canal par lequel passe le métal liquide dès qu'il est surchauffé par inducteur qui l'entoure.

1.3.4. FOURS A FUSION A ARC ELECTRIQUE

1.3.4.1. LES FOURS MARZIERE :

Le chauffage dans les fours à arc, qui sont connus sous le nom de "MARZIERE" ou "DETROIT" se fait par le rayonnement d'un arc qui jaillit entre deux électrodes de graphite placées horizontalement dans l'axe du four. La forme de la chambre de fusion à une forme presque sphérique. Ces fours, qui sont simples et peu coûteux commencent à disparaître peu à peu pour laisser la place aux fours à induction qui sont plus souple dans la mise en marche.

1.3.4.2. LES FOURS A FUSION A ARC SURCHARGE :

Le four à arc surcharge est constitué d'une cuve en acier qui est garnie de réfractaire, d'électrodes verticales, d'un dispositif mécanique et basculement, d'une voûte et d'un système d'alimentation électrique. Ces fours sont essentiellement utilisés pour l'élaboration d'aciers ordinaires à partir de ferrailles, d'aciers spéciaux et de fontes synthétiques.

Le garnissage de four doit généralement être de même nature que le laitier de l'opération de fusion et cela pour limiter l'usure. Ces fours présentent une consommation en réfractaire, en énergie, en électrode, en eau et souvent en oxygène.

1.4. EVOLUTION DE LA TECHNOLOGIE DES FOURS ELECTRIQUES A RESISTANCES

1.4.1. INTERETS ET LIMITES DES FOURS A RESISTANCES

1.4.1.1. ASPECT TECHNIQUES

- Le progrès réalisé dans les sciences des matériaux a contribué dans l'amélioration des caractéristiques des résistances, qui couvrent pratiquement l'ensemble des domaines des températures utilisées.
- Les fours à résistances fonctionnent sous différentes atmosphères.
- On peut concevoir des résistances pour des fours de formes diverses.
- Le fonctionnement du four est très simple et peut-être automatisé.

1.4.1.2. ASPECT ECONOMIQUE :

- Le fonctionnement automatique réduit la main-d'oeuvre.
- Les frais d'énergie sont minimes, comparant à des fours utilisant de l'énergie.
- Les investissements requis pour les fours à résistances sont généralement limités.

1.4.1.3. ASPECT SOCIAL :

L'absence de fumées et de bruit améliore les conditions de travail et préserve la propreté des locaux. Les systèmes d'automatisations peuvent supprimer les travaux pénibles.

1.4.1.4. LIMITATION DES FOURS A RESISTANCES :

Des obstacles sont présents mais surmontables pour le développement des fours à résistances. Le coût relativement élevé du courant, la densité de puissance, qui peut parfois être basse et la durée de vie des résistances qui est parfois non conforme aux dires des constructeurs.

1.4.2. DEVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE DES FOURS A RESISTANCES :

1.4.2.1. FOURS A RESISTANCES A HAUTE DENSITE DE PUISSANCE

Ces fours ont été développés récemment. Leur haute densité de puissance peut se rapprocher des fours à induction et leur rendement est nettement supérieur. Pour assurer une longue durée des éléments chauffants qui sont en graphite, la chambre de chauffe est baignée dans une atmosphère d'azote.

1.4.2.2. FOURS A RESISTANCE SOUS VIDE

Ces fours sont utilisés pour les traitements thermiques des métaux et particulièrement pour les métaux spéciaux et aciers de qualités. Ils peuvent remplacer les fours à bain de sels car ils évitent toute pollution. L'utilisation de ces fours, continus à se développer progressivement.

CHAPITRE **II**

ETUDE DE CONCEPTION ET REALISATION

2.1. INTRODUCTION

Le four que nous avons réalisé, est un four électrique de fusion basculant. Le four est conçu pour la fusion des métaux et alliages non ferreux dont la température de fusion ne dépassant pas 1000 °C (alliages de Pb, de Mg, de Zn, d'Al,...). La réalisation d'un tel projet s'est effectué en trois parties :

- Partie mécanique : réalisation de la carcasse métallique, et du système de basculement.
- Partie électrique et électronique : réalisation du circuit électrique et électronique, résistance -régulation, capteur de température -relai ...
- Partie thermique : réalisation de l'enceinte du four ; chambre de chauffe, isolation thermique (réfractaire, isolant thermique,...).

La réalisation des parties sus-citées a fait l'objet d'une étude sur les matériaux et les équipements utilisés afin d'obtenir un four répondant aux exigences déjà citées (atteindre la température voulue, accumuler la chaleur dégagée par les résistances ; cela revient au choix de l'isolement du four, maintien des températures d'emploi,...).

2.2. CONCEPTION ET REALISATION

2.2.1. PARTIE MECANIQUE

La réalisation s'est faite dans l'atelier du département de Génie Mécanique.

La forme du four (voir planche) est partagée en deux zones :

- La partie centrale A : enceinte du four
- Le Bâti B

L'enceinte du four, vu son importance est réalisé à l'aide d'une tôle en acier inoxydable type 18/8 ; le choix d'un tel acier justifié par de bonnes caractéristiques mécaniques, thermique et de tenue à chaud - a nécessité un sondage au chalumeau et aux brasures (tiges en alliages peut fusible) qui nous donne une enceinte totalement étanche.

Le Bâti B est réalisé par un assemblage de cornières (30 x 30 mm), recouvert de tôle en acier doux. L'enceinte du four est supportée par les deux parties 1 et 2, lesquelles sont renforcées au niveau du système de basculement par les cornières, le tout repose sur le châssis partie 3, contenant des roues permettant un déplacement facile du four.

Le système de basculement est constitué par un engrenage de deux pignons de rapport 1/3 sur le diamètre, placé au niveau du bâti conformément à la **Planche**° (1), lequel est imprimé par une manivelle se trouvant à l'extérieur, dotée d'un système de cliquet permettant le mouvement de basculement dans un seul sens.

2.2.1.1. CHOIX DES DIMENSIONS :

La forme du four que nous avons conçu au départ nous a entraîné à l'étude de son dimensionnement comme suit :

1 - Enceinte du four :

La carcasse de l'enceinte du four se présente sous forme d'un trapézoïdre dont deux faces sont des carrés de côtés 530×530 mm, ces deux faces sont inclinées d'un angle de 6° par rapport à la verticale, la base et le haut du trapézoïdre étant des rectangles de dimensions respectives : 500×530 mm et 600×530 mm voir figure n° (14) ci-dessous :

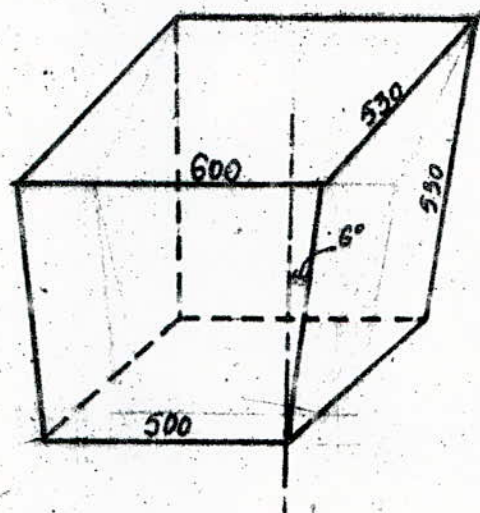


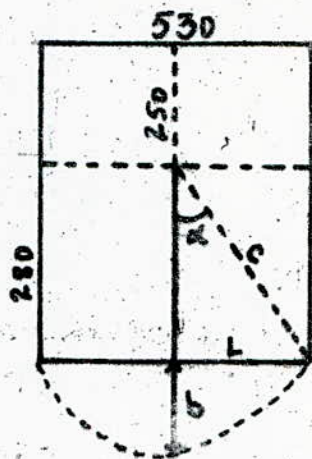
fig N° 14:
dimensions du four

Ces dimensions sont calculées à partir des grandeurs des matériaux et des équipements disponibles qui constituent l'enceinte du four (thermocouple, porte résistance, réfractaires...).

2 - Bâti :

La longueur du bâti est choisie de façon à permettre un basculement du four d'un angle de 90° , ce qui facilitera une coulée totale, le calcul suivant nous a permis le dimensionnement du bâti :
soit le côté carré (530×530 mm) du four qui balance autour du support et soit "b" la longueur de rotation du basculement.

Voir Figure n° (15) ci-dessous



$$\sin \alpha = \frac{L}{c} \Rightarrow c = \frac{L}{\sin \alpha} = \frac{250}{\sin 45^\circ} = 380 \text{ mm}$$

$$\text{or } b = 380 - 280 = 100 \text{ mm}$$

afin de permettre une rotation totale, il faut laisser donc un minimum de 100 mm entre la base du four et le châssis d'où la longueur du bâti : $530 + 100 = 630 \text{ mm}$. A cette valeur nous ajoutons 70 mm de sécurité, donc la longueur totale du bâti est de 700 mm.

L'enceinte du four supportée par le bâti est placée sur le châssis de dimensions $950 \times 530 \times 100 \text{ [mm]}$. Le tout, présente une forme d'un parallélépipède donnant au four les dimensions suivantes : $950 \times 800 \times 530 \text{ [mm]}$ voir planche.

2.2.2. PARTIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE :

Cette partie est constituée essentiellement par :

- un élément chauffant : résistance électrique
- un capteur de température : thermocouple
- un régulateur de température
- un dispositif de contrôle de l'intensité du courant électrique dans le circuit : contacteur-relais

2.2.2.1. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES MATERIAUX

1 - Elément chauffant :

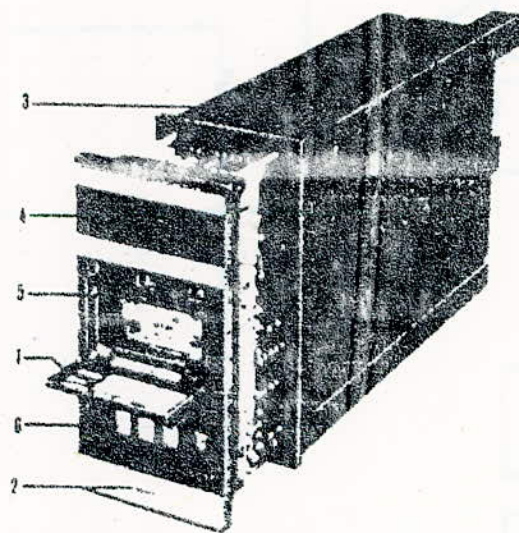
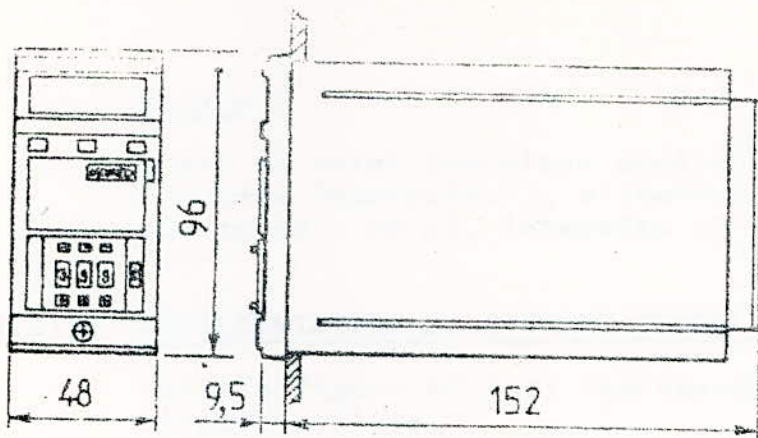
L'élément chauffant utilisé est une résistance dont le nom commercial est KANTHAL "A" de composition chimique Cr 22 - Al 5,3 - Fe présentée sous forme boudinée de diamètre en fil 1,2 mm, et du boudin 10 mm intérieur. Cette résistance est placée dans des plaques réfractaires, ayant un Ampérage de 15,6 A, et une résistivité $\rho = 1,39 \Omega \text{mm}$

2 - Capteur de température :

Le capteur utilisé est un thermocouple modèle DIN 43710 type NeNA : Chromel-Alumel (Nickel Chrome -Nickel allié) Code K2, la température maximale d'utilisation est de 1199 °C, de longueur 300 mm et de diamètre 15 mm.

3 - Régulateur de température :

Le régulateur que nous avons utilisé est un régulateur électronique avec affichage digital à 3 points de consigne compatible avec le thermocouple, la marque du régulateur est DTC -1/PRD/K2, ce dernier peut-être utilisé soit en régulation PD soit en TOR les dimensions du régulateur sont présentées sur la figure n° (16).



- 1/ Porte de protection des ajustages des paramètres de régulation et étiquette d'identification de l'appareil.
- 2/ Vis d'extraction
- 3/ Pattes de fixation
- 4/ Indicateur
- 5/ Voyant de signalisation de commande
- 6/ Affichage numérique de la consigne.

FIGURE N° 16 : DIMENSIONS DU REGULATEUR

2.2.3. PARTIE THERMIQUE

Cette partie, basée essentiellement dans l'enceinte du four, a pour but principal de minimiser les pertes thermiques et d'essayer de garder au maximum la chaleur dégagée par la résistance et l'utiliser comme énergie de travail, ceci augmente le rendement de fonctionnement du four.

2.2.3.1. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

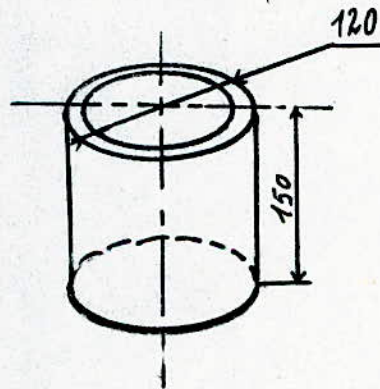
Le tableau suivant regroupe les différentes caractéristiques :

MATERIAU	NOM TECHNIQUE	POIDS SPECIFIQUE g/cm ³	CONDUCTIVITE THERMIQUE W/m°C	CP (Kcal/Kg °C)	FORME ET DIMENSION
Brique à haute teneur en Alumine 75 % Al ₂ O ₃	B 75	2,70	1,90	0,199	Parallélépipède 250 x 250 x 60
Brique réfractaire alumineuse 40 % Al ₂ O ₃	La C3/4	2,15 à 2,20	1,35	0,201	Parallélépipède 200 x 177 x 55
Brique isolante 60% SiO ₂ , 15% Al ₂ O ₃		0,4 à 0,45	0,08	1,121	Parallélépipède 230 x 110 x 60
Béton réfractaire	HSC 27	2,25	1,5	0,75	Granulé
Béton isolant	Kerlite	1,35	0,06	0,095	Granulé

(suite tableau ci-dessus)

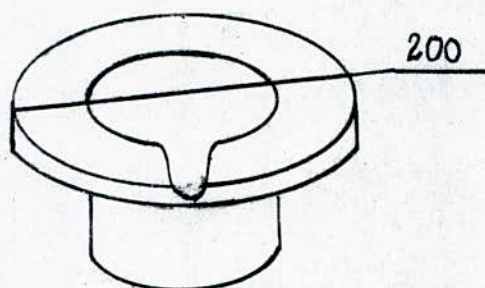
Isolant thermique Laine de verre	belle nappe		0,056	0,044	Nappe
Isolant thermique	Amiante dure		0,14	0,8	Plaque de 5mm d'épaisseur
Carcasse	Inox 18/8		16,7	0,107	Tôle
Coulis	Température d'utilisation 1450 °C			Poudre blanche	

- Le creuset que nous avons utilisé est en graphite de dimension 150 x 120 mm figure N° (18)

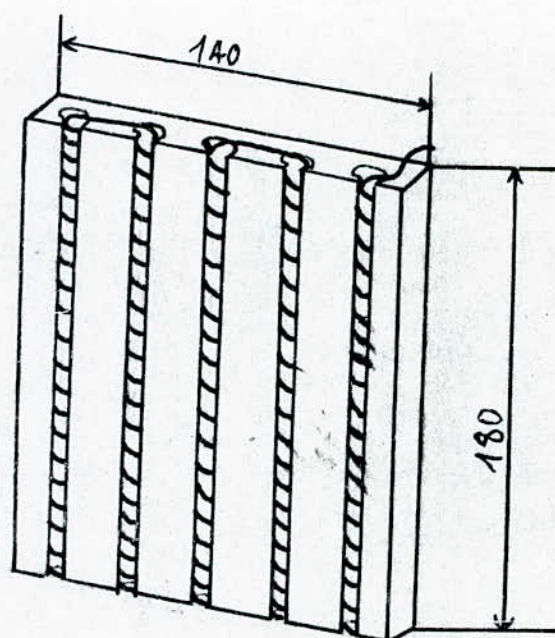


- Il est préférable d'utiliser un creuset en fonte car le graphite s'oxyde à la température de 500 °C et perd 1 % de son poids à chaque opération, le creuset en graphite est censé être utilisé dans les fours travaillant sous vide ou sous atmosphère contrôlée.

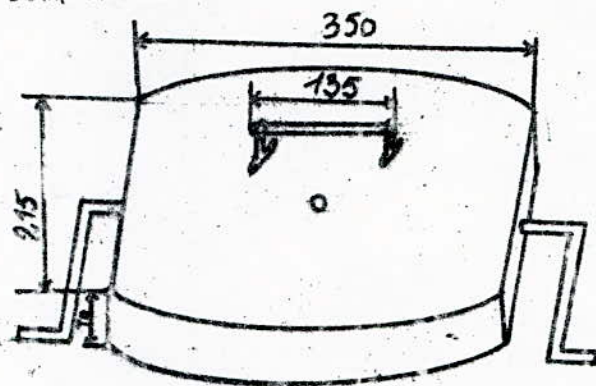
- La coulée s'effectue par un bec dont les dimensions sont représentées sur la figure n° (19)



- La résistance est placée dans des plaques réfractaires dont les dimensions sont présentées sur la figure n° (20) ci-dessous :

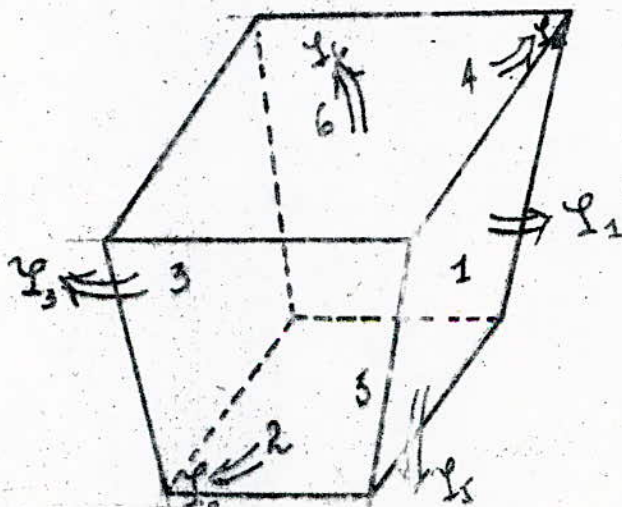


- Le couvercle dont les dimensions sont présentées sur la figure n° (21) est réalisée avec une tôle d'acier contenant des briques refractaires taillées selon la forme du bec de coulée.
- Les briques sont jointées entre elles par du coulis mélangé à du silicate de sodium résistant à haute température.



2.2.3.2. EVALUATION DE LA PUISSANCE A INSTALLER DANS LE FOUR

Soit la forme du four voir figure N° (22)



La puissance à installer dans de tel four est donnée par :

$$W = \frac{C_1 + C_2}{t} + a D \quad (\text{Voir chapitre 1.1.2.3})$$

1 - Calcul des deperditions thermiques "D" =

La forme du four nous oblige à faire un calcul des pertes thermiques suivant chaque face (les dimensions n'étant pas les mêmes : 4 faces symétriques deux à deux, les deux autres sont différentes).

Le flux est donné par la formule suivante :

$$\psi = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (\text{voir chapitre 1.1.1.2})$$

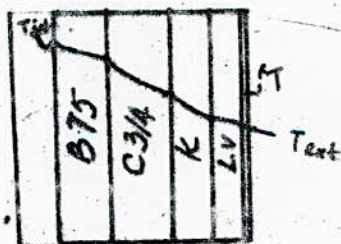
α_1 est donné par la formule suivante :

$$\alpha_1 = 1,8 (\theta_{int} - \theta_{ext})^{0,25} = 10 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_2 = 100 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

) Calcul des flux thermiques

$\psi_1 ; \psi_3$ selon les faces (1) et (3)



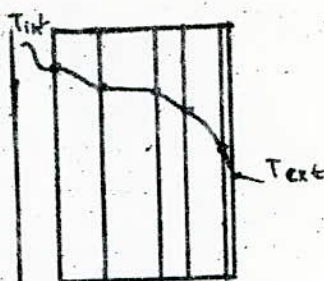
MATERIAU	e(mm)	λ W/m ² °C
B 75	60	1,90
C/34	73	1,35
K	47	0,06
LV	30	0,056
TOLE	1,5	16,7

La température intérieure = 1000 °C
La température extérieure = 60 °C

$$\psi_1 = \psi_3 = 620,63 \text{ W/m}^2$$

b) Calcul des flux thermiques φ_2, φ_4 selon les faces (2) et (4)

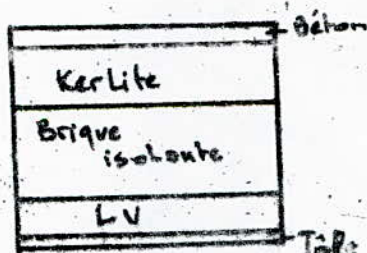
MATERIAU	e(mm)	λ W/m°C
B 75	60	1,90
C 3/4	73	1,35
K	12	0,06
Lv	30	0,056
TOLE	1,5	16,7



La température intérieure = 1000 °C
 La température extérieure = 70 °C

$$\varphi_2 = \varphi_4 = 998,28 \text{ W/m}^2$$

c) Calcul du flux thermique φ_5 selon la face (5)

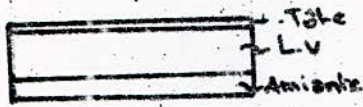


MATERIAU	e (mm)	λ W/m °C
BETON	10	1,5
K	90	0,06
Brique isolante	145	0,08
Lv	30	0,056
T	1,5	16,7

La température intérieure = 1000 °C
 La température extérieure = 20 °C

$$\varphi_5 = 246,35 \text{ W/m}^2$$

d) Calcul du flux thermique Ψ_6 selon la face (6) :



MATERIAU	e (mm)	W/m °C
Amiante	10	0,14
L.V	40	0,056
Toile	1,5	16,7

La température intérieure = 1000 °C
 La température extérieure = 80 °C

$$\Psi_6 = 1027,01 \quad \text{W/m}^2$$

ainsi $D = \sum \Psi_{iSi} = 1,322 \text{ Kw}$

2 - Calcul des accumulations thermiques "C2" :

Nous devons évaluer les différentes températures aux parois selon la formule :

$$T_n = T_{n+1} - \gamma \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{e_i}{\lambda_i} \right)$$

- L'accumulation de chaleur aux parois se fait par :

$$Q = m C_p (\theta_{\text{moy}} - \theta_i)$$

$$\text{tel que } \theta_{\text{moy}} = \frac{\theta_{i+1} + \theta_i}{2}$$

avec θ_{i+1} et θ_i les températures de part et d'autre de la paroi.

- a) Calcul des accumulations de chaleur Q_1 et Q_3 pour les parois des faces (1) et (3)

MATERIAU	MASSE (kg)	Cp(kcal/kg°C)	θ moy (°C)
B 75	9	0,199	959,18
C 3/4	5	0,201	901,57
-K	4	0,095	641,83
Lv	0,5	0,044	232,53
TOLE	4	0,107	63,1

$$Q_1 = Q_3 = 2684,41 \text{ Kcal}$$

- b) Calcul des accumulations de chaleur Q_2 et Q_4 pour les parois des faces (2) et (4)

MATERIAU	MASSE (Kg)	Cp (Kcal/kg°C)	θ moy (°C)
B 75	9	1,99	934,32
C 3/4	5	0,201	841,68
K	1	0,095	714,89
Lv	0,5	0,044	347,52
TOLE	4	0,107	74,99

$$Q_2 = Q_4 = 2393,05 \text{ kcal}$$

c) Calcul de l'accumulation de chaleur Q_5 pour les parois de la face (5)

MATERIAU	MASSE (kg)	Cp (Kcal/kg °C)	θ moy (°C)
BETON	1	0,75	986,82
K	8	0,95	788,88
BRIQUE ISOLANTE	11,22	0,121	379,22
Lv	0,5	0,044	88,51
TOLE	4	0,107	21,25

$$Q_5 = 1799,33 \text{ Kcal}$$

d) Calcul de l'accumulation de chaleur Q_6 pour les parois de la face (6)

MATERIAU	MASSE (Kg)	Cp (Kcal/kg°C)	θ Moy
Amiante	2	0,8	911,97
Lv	2	0,044	457,15
Tole	4	0,107	85,18

$$Q_6 = 1366,56 \text{ Kcal}$$

d'où

$$C_2 = \sum Q_i = 13320,81 \text{ Kcal}$$

$$C_2 = 15,50 \text{ Kwh}$$

3) Calcul de la chaleur nécessaire à l'élévation en température de la charge et du creuset "C1" :

$$C1 = m_{Al} \cdot Cp_{Al} \cdot \Delta T_{Al} + m_{cr} \cdot Cp_{cr} \cdot \Delta T_{cr}$$

$$m_{Al} = 2 \text{ kg}$$

$$m_{cr} = 0,9 \text{ kg}$$

$$C1 = 0,09 \text{ kwh}$$

La puissance à installer $W = \frac{C1 + C2}{t} + a.D$

avec "a" = 07 (valeur donnée)

t = temps de chauffage égale à 4 h

$$W = \frac{0,09 + 15,50}{4} + 0,7 \cdot 1,32$$

Donc la puissance à installer :

$$W = 4,02 \text{ Kw}$$

$$W = 4,82 \text{ Kw.}$$

2.3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES D'UTILISATION

. FICHE TECHNIQUE :

T Y P E	FOUR ELECTRIQUE A FUSION BASCULANT
POIDS	130 [kg]
- DIMENSIONS	950 x 600 x 530 [mm]
ALIMENTATION	220 [V]
FREQUENCE	50 [HZ]
AMPERAGE	15,6
TEMPERATURE D'UTILISATION	1100 [°C]
SYSTEME DE REGULATION	PROPORTIONNELLE DERIVEE
RESISTANCE	KANTHAL "A"
THERMOCOUPLE	VcNa
Puissance	4,82 [Kw]

CHAPITRE III

ETUDES DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

3.1. ETUDE CINETIQUE

3.1.1. LA PHASE DU CHAUFFAGE

L'évolution de la température, au cours du chauffage de 0°C, a nécessité un temps égal à 4 heures. Ce temps s'est accentué à partir de 800°C où l'accumulation au sein du four a atteint son maximum, d'où une diminution considérable de la vitesse de montée en température. (voir courbe N° 1.)

Nous remarquons à titre d'exemple que le temps de montée entre 400° C et 600° C a nécessité 25 minutes alors que le temps de montée entre 800° C et 900° C a nécessité 50 minutes. La différence étant ainsi considérable, ce qui nous a poussé à considérer cette courbe selon deux parties différentes :

- la première partie se situe entre 35° C et 800° C et la deuxième partie entre 840° C et 1000° C :

- La vitesse moyenne de chauffage entre 35° C et 800° C pour un temps de 120 m :

$$V_1 = \frac{800 - 35}{120} = 6,38^\circ \text{ C/min}$$

- La vitesse moyenne de chauffage entre 840° C et 970° C pour un temps de 125 minutes est :

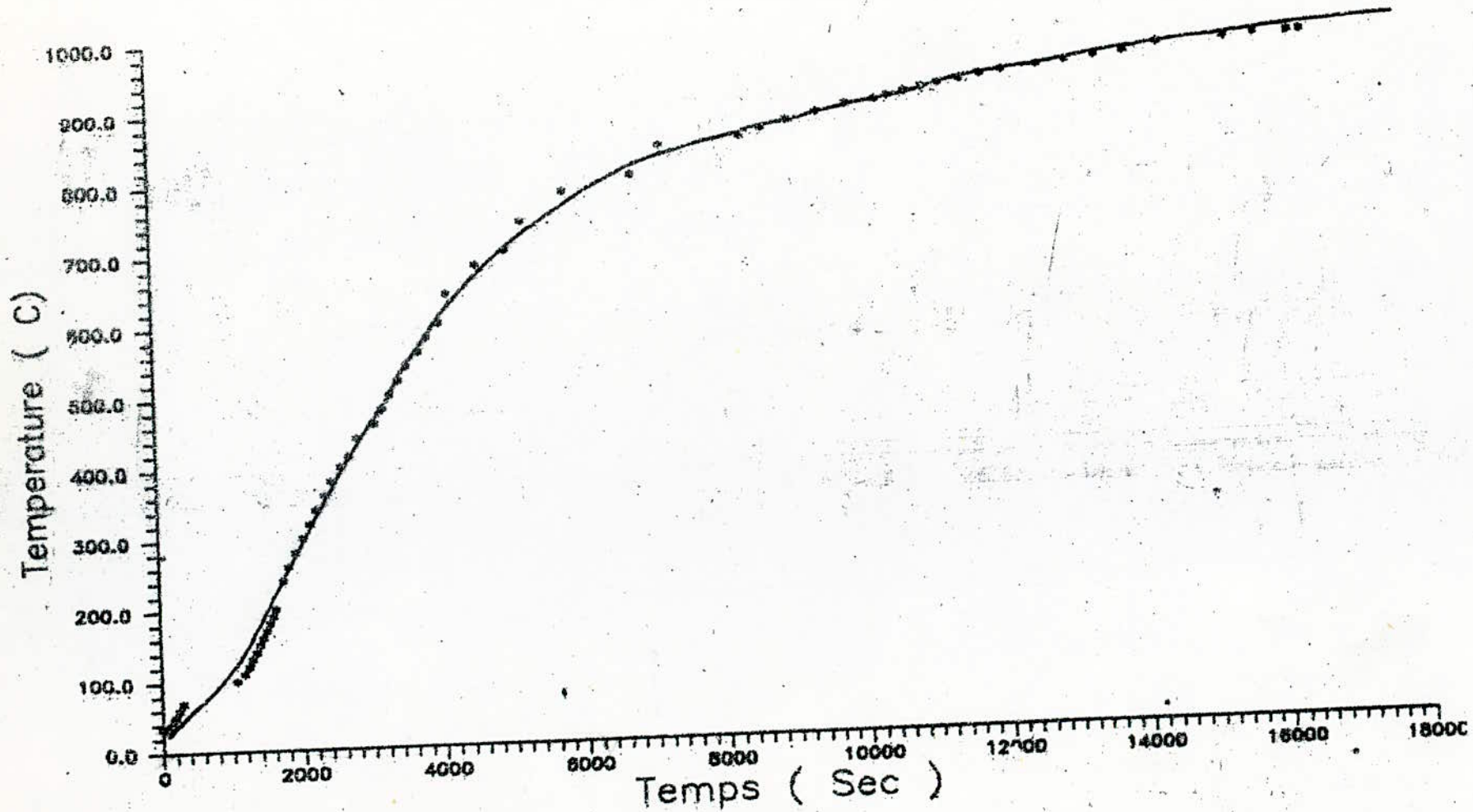
$$V_2 = \frac{970 - 840}{125} = 1,04^\circ \text{ C/min}$$

- La vitesse moyenne totale de chauffage entre 35° C et 1000° C pour un temps de 4 heures est de l'ordre de :

$$\bar{V} \quad 3,90^\circ \text{ C /min}$$

Malgré une vitesse de chauffage faible, ce four est apte à garder une haute température qui nécessitera une très faible énergie pour sa remise en marche appliquée à d'autres opérations.

Courbe N°1 évolution de La température en fonction du temps pendant le chauffage



3.1.2. LA PHASE DU REFROIDISSEMENT

Pour la courbe de refroidissement, elle présente aussi deux parties séparées. Nous remarquons que le four a tendance à descendre rapidement en température et à parvenir à se stabiliser vers une baisse plus faible en température, cela revient à la bonne accumulation de chaleur des parois qui compense ces baisses et entraîne un maintien suffisamment long. D'où un temps élevé pour la phase de refroidissement. (cf. courbe N°2)

Ainsi, si nous considérons cette courbe, nous remarquons que la vitesse de refroidissement entre 900° C et 600° C se fait en 47 minutes :

$$- \text{d'où une vitesse moyenne } V^1 = \frac{900 - 600}{47} = 6,38^\circ\text{C/min}$$

alors que la vitesse moyenne de refroidissement entre 500° C et 42° C a nécessité un temps de 1343 min., donc :

$$V^2 = \frac{500 - 42}{1343} = 0,34^\circ\text{C/min}$$

et la vitesse moyenne entre 900° C et 42° C est :

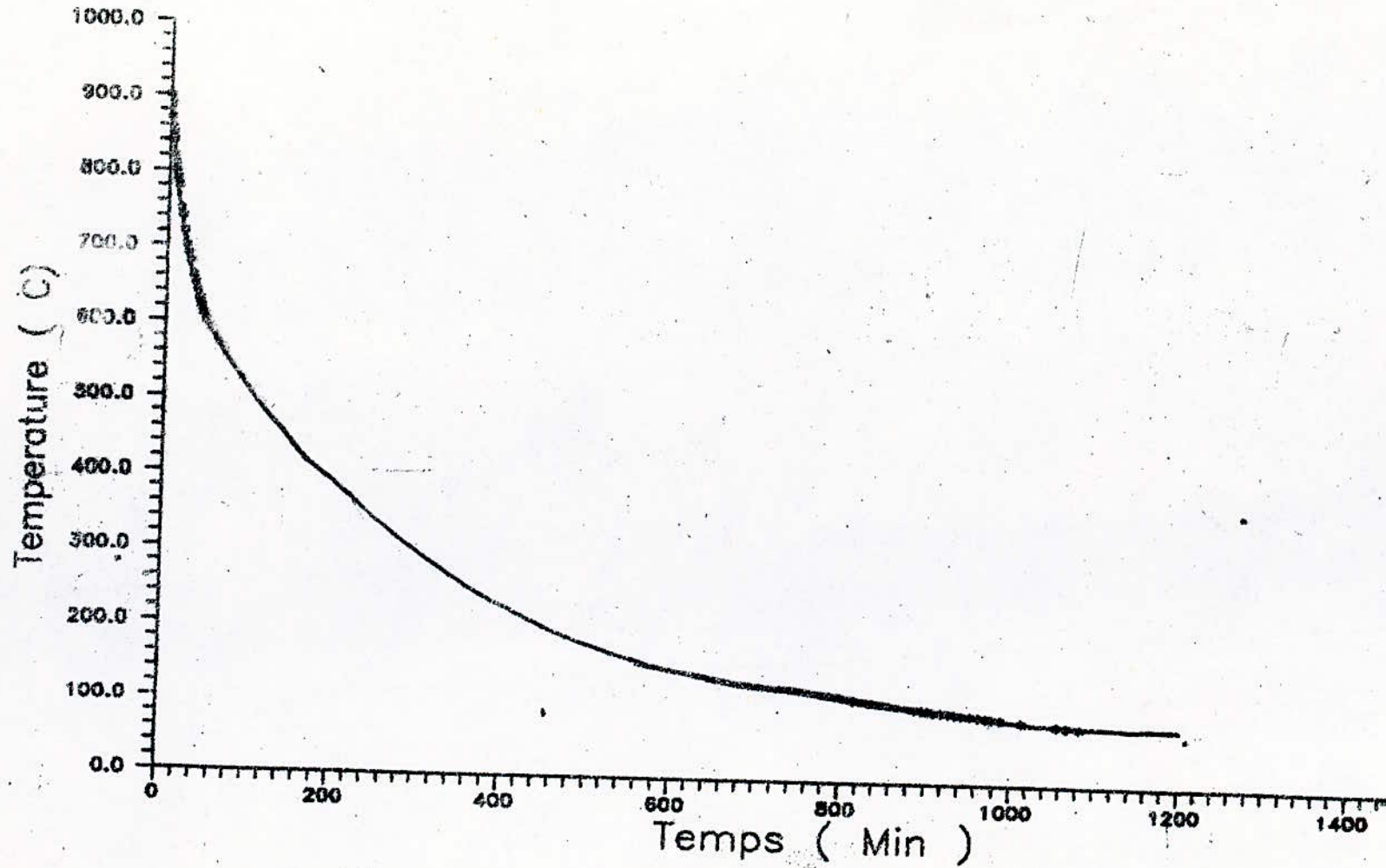
$$\bar{V} = \frac{900 - 42}{1463} = 0,6^\circ\text{C/min}$$

Nous pouvons considérer qu'une durée de 4 heures pour atteindre une température de 1000° C est excessive en comparaison avec les fours industriels modernes (type Heraeus, Controlab.). Ceci est dû à la nature des matériaux utilisés.

A titre d'exemple, le four Heraeus utilise une isolation thermique totale avec de l'amiante, la conductivité thermique de tel réfractaire est de l'ordre de : 0,8w/m² °C et qui est nettement plus faible que les réfractaires que nous avons utilisés et qui sont alumineuses, leur conductivité thermique est comprise entre 1,35 à 1,90 w/m² °C. Une faible conductivité thermique permet une meilleure accumulation de la chaleur.

Dans le cas du refroidissement, une baisse de température de 900° C à l'ambiante nécessite 25 heures environ ; ce qui est comparable avec le four HERAEUS :

Courbe N°2 : Courbe de refroidissement



3.2. CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

L'étude des conditions de fonctionnement est basée sur l'étude des deux courbes (3) et (4) qui présentent le système de régulation installé pour réguler la température du four.

La régulation utilisée est d'une action "proportionnelle dérivée" (PD), dont l'action Dérivée augmente la vitesse du chauffage (le dépassement de la consigne affichée, aux basses températures) (voir courbe 3) et l'action proportionnelle stabilise la température selon la consigne.

Nous remarquons qu'aux hautes températures, le rôle de l'action Dérivée n'intervient presque plus, vu la grande accumulation de chaleur qui a entraîné une diminution dans la vitesse de chauffage et avec l'action proportionnelle, une stabilité parfaite à la consigne affichée.

La mise en marche du four se fait à l'aide de deux interrupteurs : l'un concernant l'alimentation du four et l'autre pour actionner la résistance.

Ce dernier, branché entre le régulateur et la bobine du relais, est actionné quand le voyant rouge se trouvant sur le régulateur (voir figure n° 16) est allumé entraînant le chauffage.

Pour le cas du refroidissement, il est conseillé, après avoir éteint l'interrupteur d'alimentation de la résistance, de remettre à zéro l'affichage digital de la régulation principale : le voyant rouge (1) du point de consigne s'éteint automatiquement. Ceci nous permettra l'évaluation de la température de refroidissement en fonction du temps.

L'étalonnage de la consigne affichée étant très délicat, nous conseillons l'utilisateur qu'en cas de dérèglement de l'écart de statisme MR, d'essayer de l'ajuster minutieusement à partir du bouton (8) (voir figure n° 16) sans toucher le réglage de la bande proportionnelle xp - bouton (7).

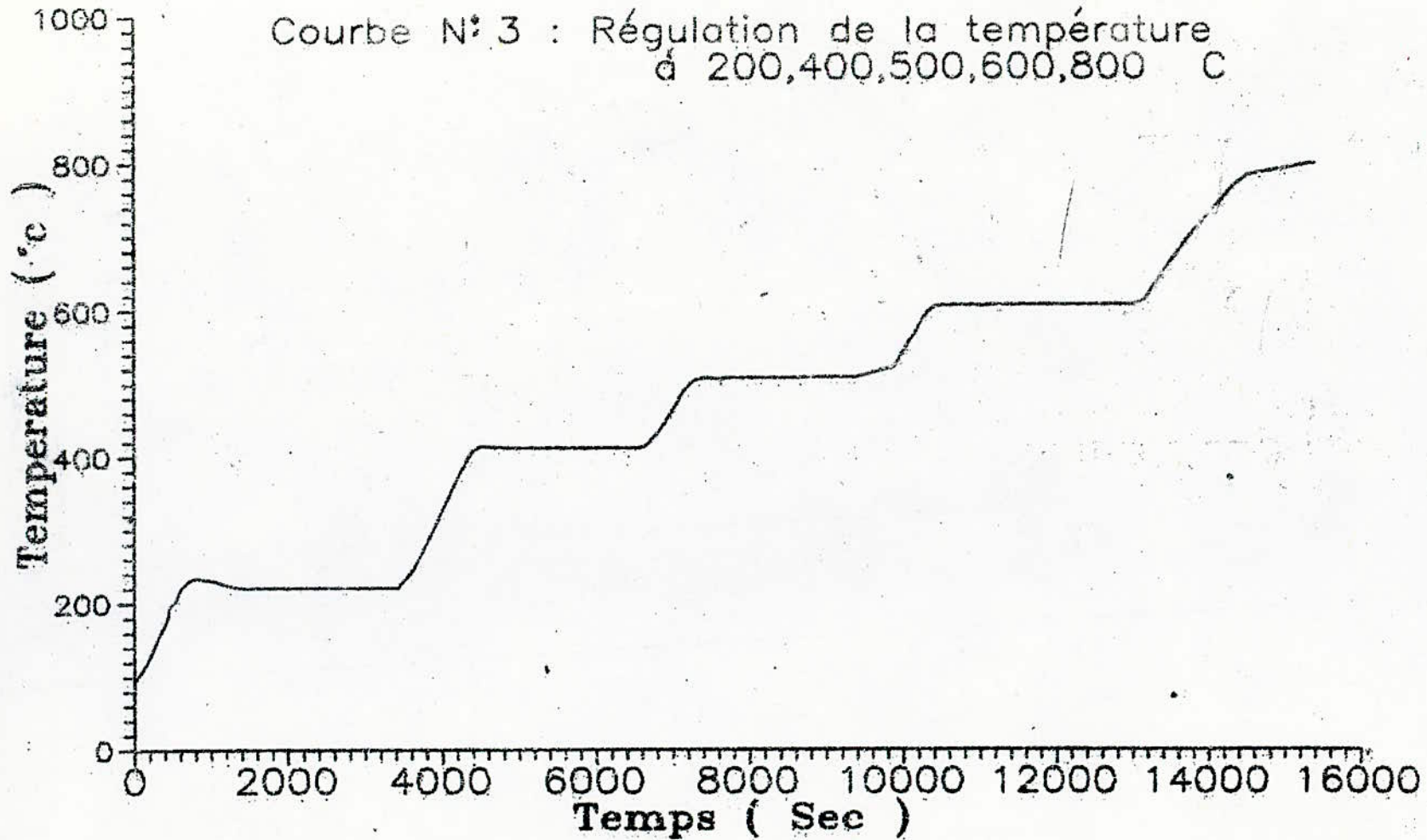
Dans le cas d'utilisation du four pour de longs maintiens et/ou à des températures élevées, de faire fonctionner le ventilateur par l'intermédiaire de l'interrupteur qui se trouve du côté de la manivelle.

Tous ces conseils permettent de garder un bon fonctionnement du régulateur.

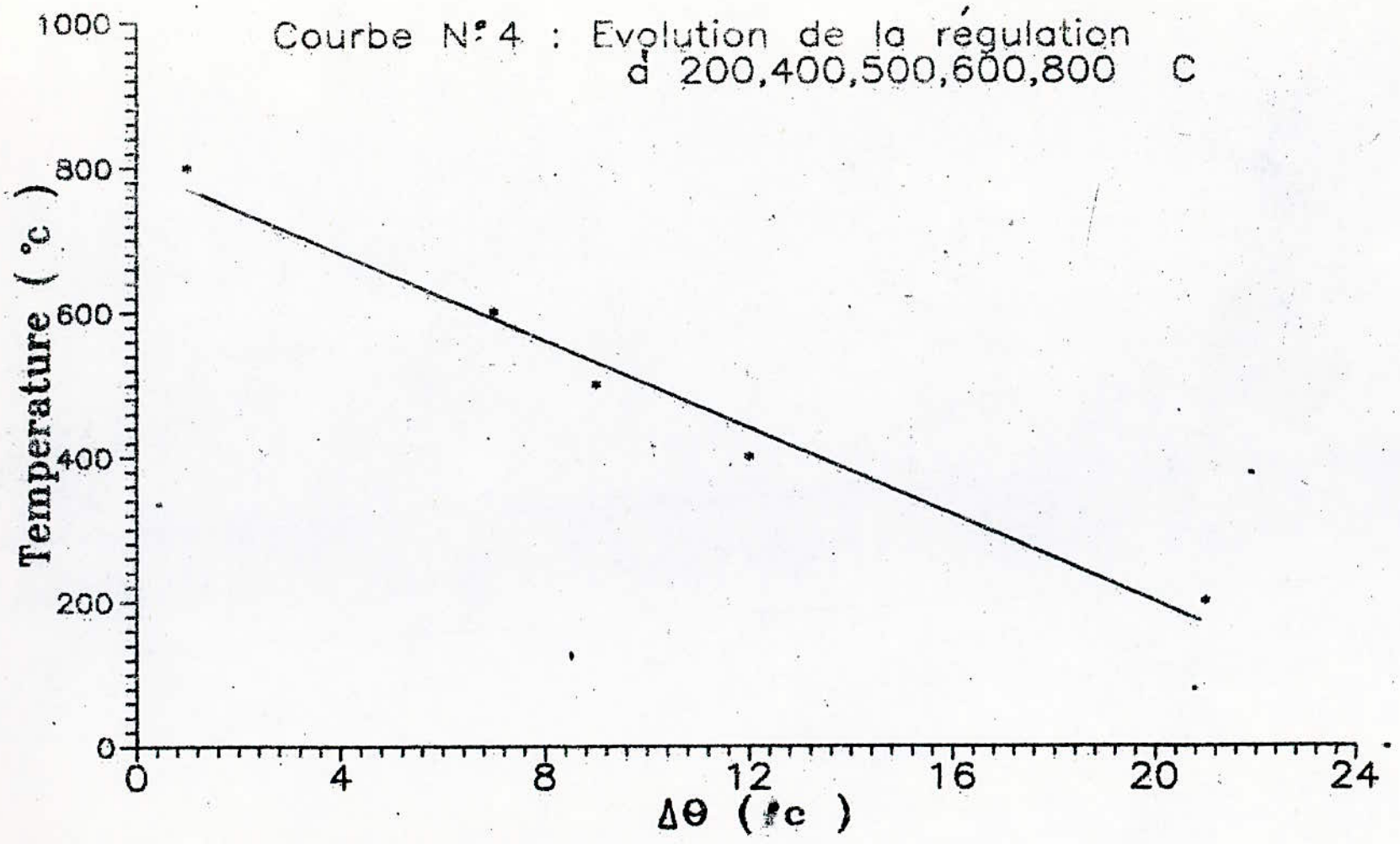
Vu le poids élevé de l'enceinte chauffante, nous conseillons l'utilisateur de faire très attention, lors de la coulée, le basculement du four doit se faire lentement afin de maîtriser l'opération de coulée.

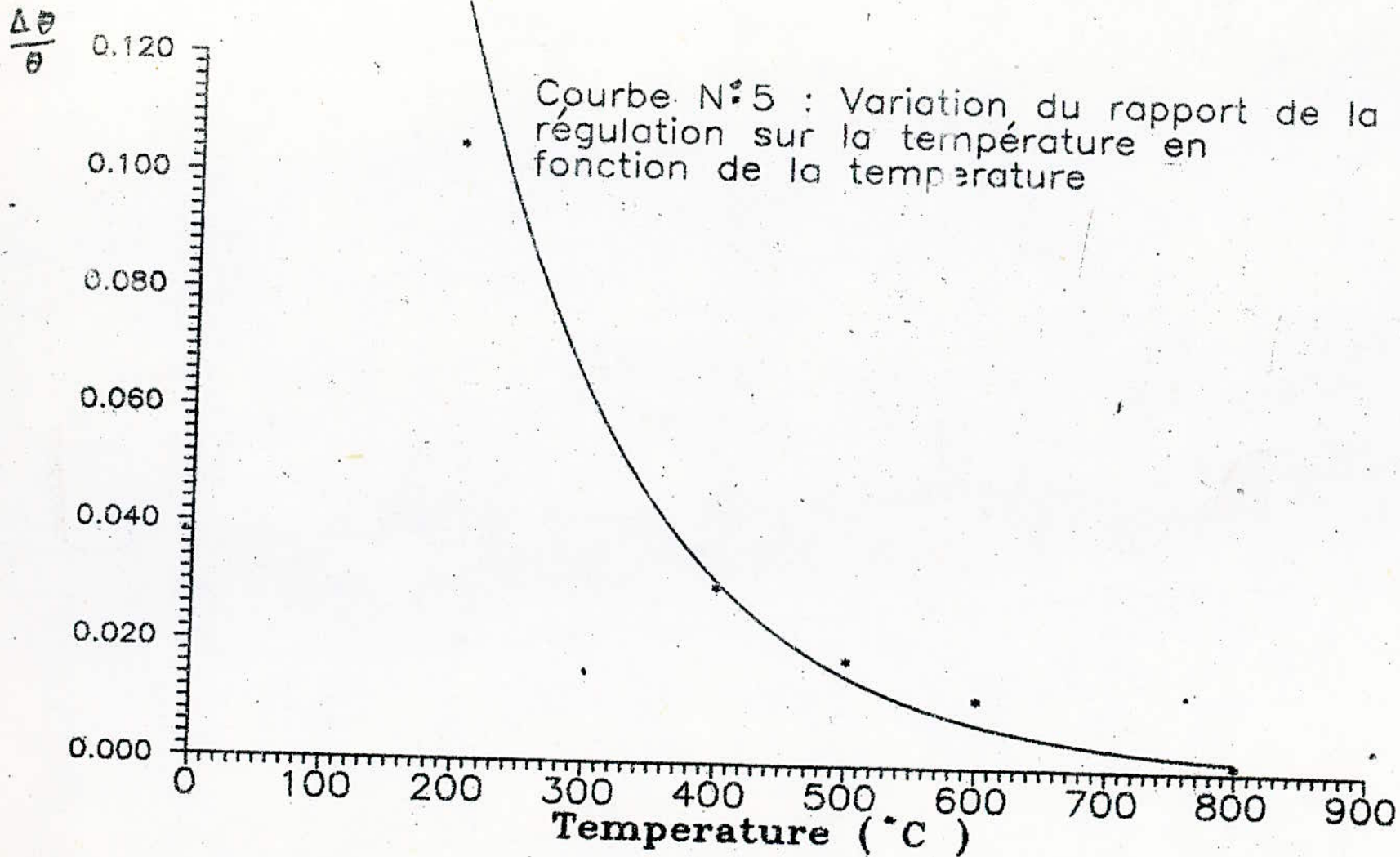
Il est à prévoir qu'à la fin de l'utilisation du four, de le bloquer à l'aide des deux supports (voir planche).

Courbe N° 3 : Régulation de la température
à 200,400,500,600,800 C



Courbe N° 4 : Evolution de la régulation
d' 200,400,500,600,800 C





CARTE THERMIQUE :

Il est très important d'étudier la répartition de la température dans le creuset, et cela en fixant la température et en déplaçant le thermocouple suivant les trois axes (x,y,z). Cette étude appelée carte thermique (voir courbe n° (6) et n° (7), détermine la distribution de la température dans le creuset.

Nous remarquons qu'il y a une nette différence entre la température affichée au bas du creuset (Z = 0mm ; $\theta = 620$ °C) et en haut du creuset (Z = 145 mm ; $\theta = 520$ °C), la hauteur totale du creuset étant de 150 mm.

Par contre, la température est presque homogène (10 °C près) à un niveau donné (Z = constante) et en déplaçant le thermocouple dans le plan xy.

En étudiant la courbe n° 7, nous remarquons que la température θ est linéaire selon l'axe (Oz). La température passe de 620 °C au fond du creuset à 520 °C au niveau supérieur, pour une hauteur totale du creuset de 150 mm.

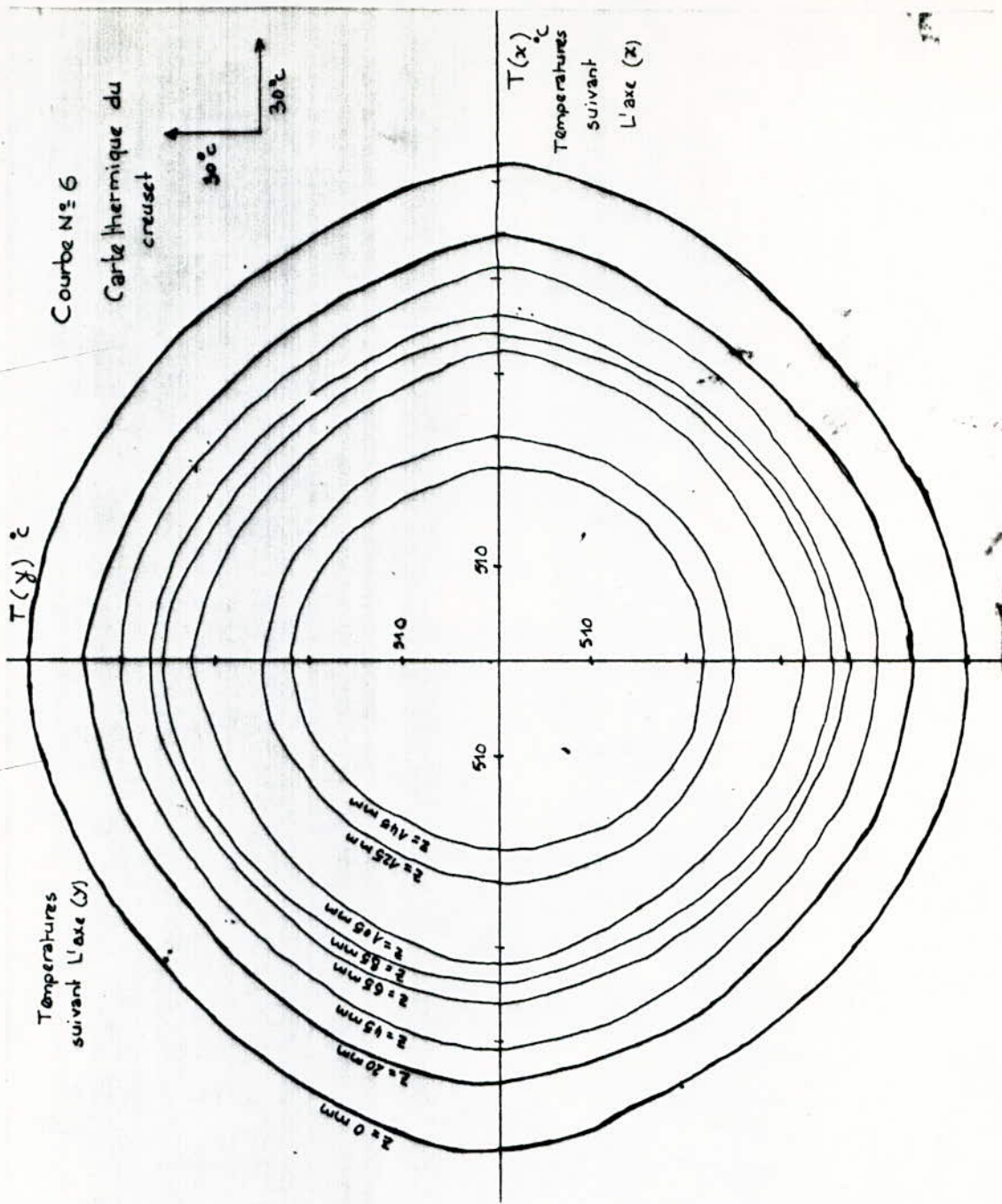
Le gradient thermique selon l'axe (Oz) est donc de 100 °C pour toute la hauteur du creuset et de 50 °C entre le centre du creuset et les parties limites, inférieures et supérieures.

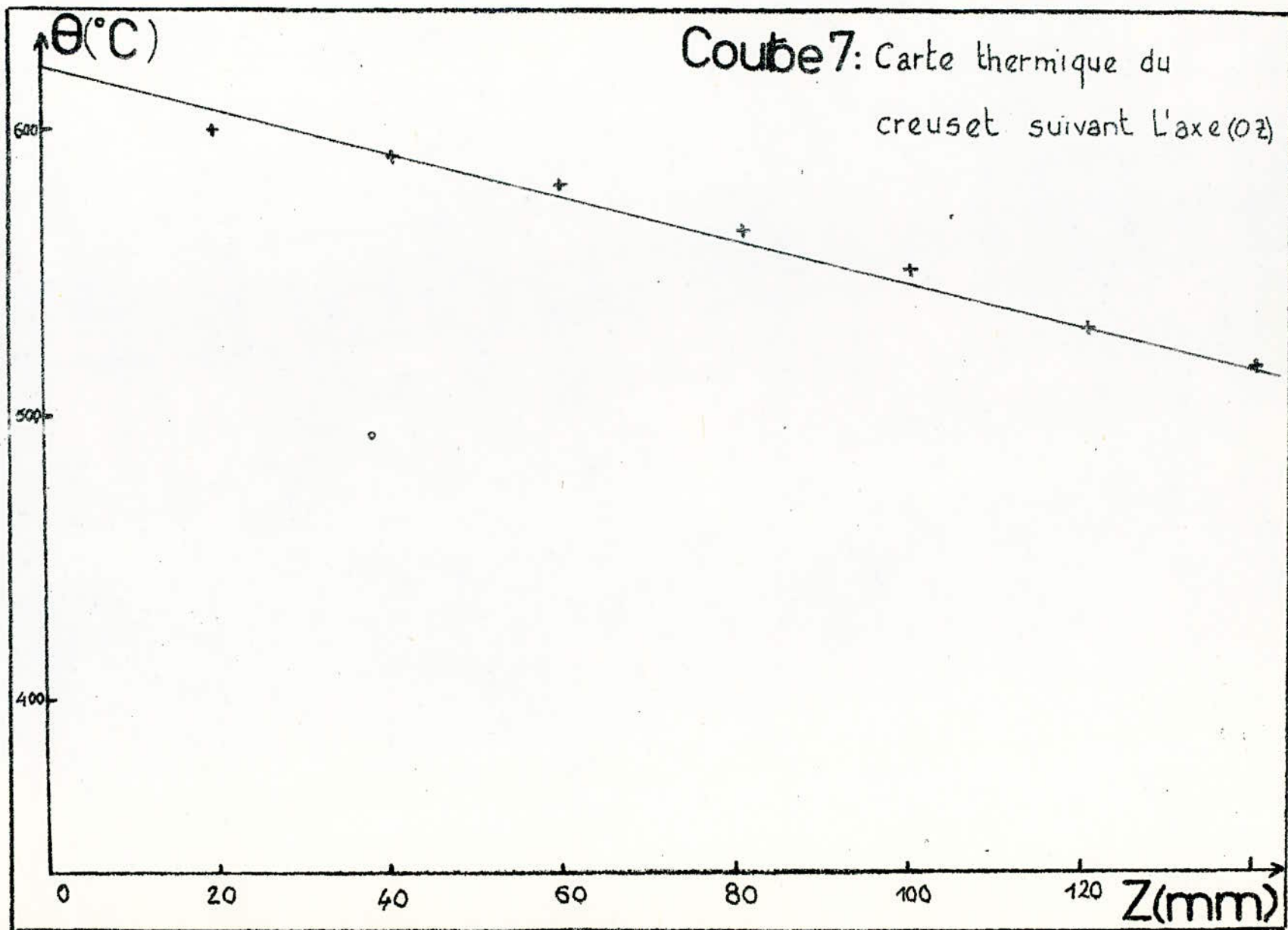
L'équation linéaire de la variation de la température suivant l'axe (Oz) est :

$$\theta(z) = \frac{2}{3} z + 620$$

Ce résultat permettra de fixer la température de travail du four dans les opérations de fusion des alliages, en tenant compte de la quantité de matière à fondre et donc, de la côte (z) correspondante.

Nous pouvons conclure, en étudiant la courbe N° (6), qu'à un certain niveau (xy), les gradients thermiques décrivent des isothermes de température croissante des parois vers le centre du creuset. La température minimale du creuset est atteinte au centre de la partie supérieure, et la température maximale est atteinte au niveau du contact des parois avec la base du creuset.





CHAPITRE **IV**

PERSPECTIVES ET DEVELOPPEMENTS

- 1/- vu la technologie moderne se basant sur la miniaturisation des matériaux de construction gardant toujours leurs bons fonctionnements ; choisir les bons réfractaires de dimensions réduites (réduction des dimensions du four, en gardant toujours la même forme et constitution.
- 2/- réaliser un système de basculement automatique et qui est facilement réalisable.
- 3/- prévoir un système de refroidissement à l'eau. Ce qui permettra de régler la vitesse de refroidissement et par conséquent agira sur la structure de solidification du métal.

CONCLUSION

CONCLUSION

Ce mémoire de fin d'étude a pour objectif :

- 1 - L'étude de conception d'un four électrique
- 2 - La réalisation du four pour fusion d'alliages non ferreux

Les travaux ont été fait à l'Ecole Nationale Polytechnique (Département de Métallurgie et de Génie Mécanique). Le choix des matériaux de construction a fait l'objet d'un compromis entre la performance et la disponibilité de ces matériaux.

Nous devons signaler en accord avec Monsieur ABADLI qu'un tel projet n'aurait pas dû être réalisé, si la décision de ramener de l'étranger certaines parties non disponibles en ALGERIE, n'a été prise, tels le régulateur, le thermocouple et les éléments chauffants.

Le four que nous avons réalisé, est destiné aux travaux de laboratoire, il pourra fonctionner sous atmosphères contrôlées et cela en lui adaptant le système adéquat. Une étude d'extrapolation à l'échelle industrielle est recommandée. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux des fours industriels performants (marque HEAREUS). Ces résultats sont concluants et fiables.

Nous constatons les consommations importants d'énergies pour ce four, lors du chauffage et de la forte accumulation lors du refroidissement. Ceci est dû à la nature des éléments chauffants et à la nature des réfractaires utilisés. C'est pourquoi la tendance est à la construction des fours à induction.

Aussi, comme mesures à prendre pour améliorer le rendement et la performance du four nous recommandons :

- l'utilisation de réfractaires plus appropriés (siliceuses, amiantes),
 - améliorer la finition des travaux de découpage et de soudage.
- Ces travaux effectués par nous même ne sont pas d'une grande qualité.

ANNEXE

I

TRANSMISSION DE LA CHALEUR

I.1 CONDUCTION

Transport de la chaleur d'un endroit vers un autre sous l'effet d'un gradient de température sans déplacement des particules (voir plus de détail au chapitre : Electrothermie industrielle).

I.1.1. RÉGIME PERMANENT

La transmission unidimensionnelle en régime permanent suit la loi de Fourier :

$$\Phi = +\lambda A \left(-\frac{d\theta}{dx} \right)$$

Φ = quantité de chaleur transmise à travers A dans la direction x

A = section de la paroi

λ = conductivité thermique

EQUATIONS RELATIVES A DES FORMES COURANTES

1 - Calcul du flux

- La section A est constante

$$\Phi = \lambda_m A \frac{\Delta\theta}{x} \quad \text{avec} \quad \Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$$

$$x = x_2 - x_1$$

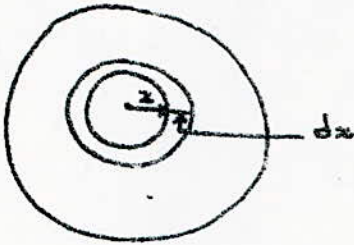
$$\lambda_m = \frac{1}{\theta_1 - \theta_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \lambda d\theta \quad \text{si } \lambda = \lambda(\theta)$$

- La section A est variable

$$\Phi = \lambda_m A_m \frac{\Delta\theta}{x}$$

; A_m : valeur moyenne de la surface

- 2 - Cas d'un cylindre creux telle que la section A est proportionnelle au rayon de distance intérieure x_1 et distance extérieure x_2



$$\Phi = \frac{2\pi L \lambda_m (\theta_1 - \theta_2)}{\ln x_2/x_1}$$

$$A = 2\pi x L$$

- 3 - Cas d'une sphère creuse ; la section A est proportionnelle à r^2

$$A = 4\pi x^2$$

$$\Phi = \frac{4\pi \lambda_m \Delta\theta}{\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2}\right)} = \frac{4\pi x_1 x_2 \lambda_m \Delta\theta}{x_2 - x_1}$$

$$A_m = 4\pi x_1 x_2 = \sqrt{A_1 A_2}$$

- Notion de conductance :

$$c = \frac{\sum \Phi}{\Delta\theta} \quad ; \quad \text{appelé conductance}$$

la conductance par unité de surface : $c' = \frac{c}{A} = \frac{\sum \Phi_i}{A \Delta\theta}$

Le transfert par conductance

$$\Phi = \lambda_m A_m \frac{\Delta\theta}{x} \quad ; \quad c = \frac{\Phi}{\Delta\theta} = \frac{\lambda_m A_m}{x}$$

- Notion de résistance :

$$R = \frac{l}{c} \quad ; \quad R = \frac{X}{\lambda m A m}$$

$$\Phi = \frac{\Delta \theta}{R}$$

Le flux par n parois : $\Phi = \frac{\sum \Delta \theta_i}{\sum R_i} = \frac{\sum \Delta \theta_i}{\sum \frac{x_i}{\lambda_i A_i}}$

I.1.2. REGIME VARIABLE :

Le régime variable se définit par la variation de la température suivant le temps en un point donné :

- solution analytique :

soit une plaque métallique de volume V de surface A d'épaisseur 2m de température θ est mise en contact de l'air chaud θ_a .

La quantité de chaleur dQ à un instant quelconque du début du chauffage est transmise pendant un temps dt dépend de "A" de $\Delta \theta$ et de h : coefficient de transmission calorifique entre les deux milieux :

$$\frac{dQ}{dt} = Ah(\theta_a - \theta)$$

Etant donné, la valeur élevée du λ du métal, et soit ρ la densité et Cp la chaleur spécifique de la plaque On a :

$$\begin{aligned} dQ &= hA(\theta_a - \theta) dt \\ &= V \rho C_p d\theta \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \ln \frac{\theta_a - \theta_b}{\theta_a - \theta} = \frac{hAt}{V \rho C_p} \quad \theta = \theta_b \text{ à } t = 0$$

- Equation différentielle de la conduction en régime transitoire.

L'équation différentielle totale découle de l'équation de base de Fourier, en considérant un élément de volume, de surface ds = dydz et d'épaisseur dx :

Si la distance x est très petite, la convection naturelle n'intervient pas et la chaleur se transmettra par conduction :

$$\Phi_{\lambda} = \frac{\lambda A (t_{s1} - t_{s2})}{x}$$

et le rapport $\frac{\Phi_c}{\Phi_{\lambda}} = \frac{h_c x}{\lambda}$

A = aire de surface

C_p = chaleur spécifique

h = coefficient de transmission de chaleur entre fluide et surface

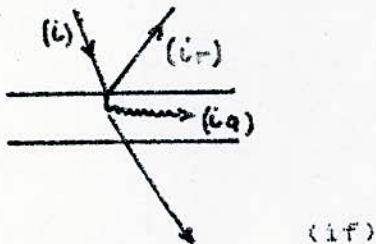
μ = viscosité dynamique

g = pesanteur

β = Coefficient de dilatation

1.3. RAYONNEMENT

Quant un rayon incident frappe un corps, une partie de l'énergie incidente (i) est réfléchie par la surface (i_r) ; une autre partie absorbée par le corps (i_a) qui s'échauffe, enfin le reste qui a été filtré (i_f) à travers le corps, continue son chemin.



corps tel que $r + a + f = 1$

Si	$a = 1$	corps noir
	$f = 1$	corps filtrant parfait
	$r = 1$	corps réflecteur parfait

La loi de Kirchoff généralisée pour le corps gris
 indépendant de la longueur d'onde λ , à une température
 (T) : le pouvoir émissif $E_T = a_T \cdot E_{OT}$

a_T = pouvoir absorbant

E_{OT} = pouvoir émissif total du corps noir

Le pouvoir émissif total monochromatique du corps noir
 est fonction de (λ) et (T) s'exprime selon la formule de
 PLANCK

$$E_{OT} = \frac{A}{\lambda^5 (e^{\frac{C}{\lambda T}} - 1)}$$

$$A = 3,58 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2$$

$$C = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

L'intégration de la formule de PLANCK quelque soit la
 longueur d'onde (λ) donne le pouvoir émissif total.
 On obtient la loi de STEPHAN BOLTZMANN

$$E_{OT} = \int_0^{\infty} E_{\lambda T} d\lambda = \sigma_0 T^4$$

σ_0 = Coefficient de STEPHAN BOLTZMANN

ANNEXE II

TABLEAU N° (1)

CARACTERISTIQUES DE QUELQUES PRODUITS REFRACTAIRES
COURANTS

REFRACTAIRE	BASE	TEMPERATURE DE FUSION (°C)
SILICE	SiO ₂	1700
ARGILE	2 SiO ₂ - Al ₂ O ₃ - 2H ₂ O	1700
SILLIMANITE	SiO ₂ - Al ₂ O ₃	1800
ALUMINE, BAUXITE	Al ₂ O ₃	2050
FER CHROME, CHROMITE	FeO - Cr ₂ O ₃	2000
CARBONE	C	3000 (1)
CARBURE DE SILICIUM	SiC	2500
CHAUX VIVE	CaO	2200-2570
MAGNESIE	MgO	2800 (2)
DOLOMIE	CO ₃ Ca - CO ₃ Mg	2300
ZIRCON	SiO ₄ Zr	2000
ZIRCONE	ZrO ₂	2400-2500

(1) Température de volatilisation

(2) Ramollissement à 1300 si impur

TABLEAU N° (2) : CLASSIFICATION DES MATERIAUX ISOLANTS SUIVANT LEUR TEMPERATURE MAXIMALE D'UTILISATION

TEMPERATURE MAXIMALE D'UTILISATION(°C)	CLASSE	MATIERE ISOLANTE
90		<p>SANS IMPREGNATION :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Coton, soie, papiers, carton, bois -Caoutchouc -Polyacrylates, fibres d'acetate de cellulose, fibre de polyamide fibre vulcanisée
110	A	<ul style="list-style-type: none"> -Coton, soie, papiers, cartons, bois, fibre d'acetate de cellulose, fibre de polyamide, fibre vulcanisée (avec imprégnation par résines naturelles ou immersion dans diélectrique liquide) -Acetate de cellulose, résines polyesters
120	E	<ul style="list-style-type: none"> -Stratifiés coton ou papier agglomérés avec résines mélamines -Résines polyesters -Toiles vernies à base d'alkydes et d'huile
130	B	<ul style="list-style-type: none"> -Fibre de verre amiante pour isolation de fil avec imprégnation aux vernis gras -Tissu de verre et amiantes imprégnés aux vernis à base de résine synthétique et d'huile -Mica aggloméré aux résines alkydes, polyesters -Stratifiés de tissu de verre, Stratifiés amiantes agglomérés aux résines mélamines phénolines ou polyesters

TABLEAU N° (3)

CARACTERISTIQUES MOYENNES DE QUELQUES ISOLANTS
THERMIQUES

DESIGNATION DU CALORIFUGE	CONDUCTIVITE THERMIQUE 1àC°(W/m°c)	POIDS SPECI- FIQUES (Kg/m3)
AMIANTE	0,14	5,76 (1)
CARBONE DE MAGNESIUM	0,056	250 (2)
LAINÉ DE LAITIER	0,03-0,06	120-250
BRIQUES CUITES (KIESEL GUHR)	0,08	180-250
BETON CELLULAIRE	0,06-0,2	260-000
LAINÉ DE VERRE	0,056	220
LIEGE (GRAINS)	0,04	80-100 (3)
LIEGE AGGLOMERE	0,06	250-300(3)
LAINÉ	0,037	136
KAPOK	0,034	18
FEUTRE	0,31	120
EAU	0,50	1000
AIR SEC EN MOUVEMENT	0,120	1,3
AIR SEC MOBILE	0,02-0,035	1,3

(1) - Résiste à 800 °C Amiante $4SiO_2-3MgO-CaO$

(2) - Jusqu'à 300 °C

(3) - Au dessous de 120 °C

TABLEAU N° (4)

CARACTERISTIQUES DE QUELQUES REFRACTAIRES
ISOLANTS

CARACTERISTIQUES	M A T E R I A U X			
	BRIQUE SURCOMPRIME	BRIQUE ISOLANTE	BETON ISOLANT	FIBREUX
CONDUCTIVITE THERMIQUE W/m°C	1,4	0,28	0,27	0,19
MASSE VOLUMIQUE	2,3	0,8	1,25	0,1

TABLEAU N° (5) TENSIONS AUX BOUTS
 TERMOCOUPLE DU TYPE CHROMEL-ALUMEL EN MILLIVOLTS

°C	0	50	100	150	200	250	300	350	400
FEM (MV)	0,00	2,02	4,10	6,13	8,13	10,16	12,21	14,29	16,40

°C	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
FEM (MV)	18,51	20,63	22,78	21,91	27,03	29,14	31,15	33,30	35,26	37,38

°C	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
FEM (MV)	39,27	41,31	43,25	45,16	47,12	48,89	50,77	52,16	54,27

TABLEAU N° (6) CARACTERISTIQUES DES RESISTANCES EN FER-CHROME-ALUMINIUM , Fe-Ni-Cr, Ni-Cr

CARACTERISTIQUES	Ni 80 Cr 20	Ni 70 Cr 30	FeNi 60 Cr 15	FeNi 45 Cr 23	FeNi 36 Cr 18	FeNi 32 Cr 20	FeNi19 Cr25	FeNi 10 Cr 10
DENSITE	8,35	8,15	8,2	8	8	7,9	7,9	7,9
POINT DE FUSION(°C)	1400	1400	1400	1400	1390	1390	1380	1380
COEFFICIENT MOYEN DE DILATATION EN 10 ⁻⁶ /°C ENTRE 0°C ET: -500°C -1000°C	15,5 17,5	15 17,5	15,5 17,5	16 17,8	16 18	16 18	16,3 19,5	18
CHALEUR SPECIFIQUE A 20°C (Wh/Kg °C)	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
RESISTIVITE A 20°C $\Omega \cdot cm$	100	110	112,2	112	105	104	95	74
COEFFICIENT MOYEN DE TEMPERATURE DE LA RESISTIVITE (10 ⁻⁶ /°C)	52	50	120	150	250	250	400	330
TEMPERATURE MAXIMALE D'UTILISATION (°C)	1200	1250	1100	1150	1050	1050	950	500
CHARGE MAXIMALE USUELLE EN W/CM ² -800 °C -900 °C	2,2 1,7	2,4 1,9	2 1,5	2 1,5	1,8 1,3	1,8 1,3	1 0,5	
CARACTERISTIQUES	G 22 - Al 5,5 - Fe		G 22 - Al 5,0 - Fe		G 22 - Al 4,5 - Fe			
TEMPERATURE MAXIMALE D'UTILISATION EN REGIME PERMANENT (°C)	1375		1330		1280			
RESISTIVITE 20°C $\Omega \cdot cm$	145		130		135			
POINT DE FUSION (°C)	1500°C ENVIRON							
CHALEUR SPECIFIQUE 20°(Wh /Kg) °C)	0,13							

TABLEAU N° (7)

CARACTERISTIQUES DES RESISTANCES EN PLATINE ET
PLATINE RHODIE

PROPRIETES	PT	PT-RH à 10 %	PT-RH à 20 %	RH
DENSITE	21,5	20	18,75	12,48
TEMPERATURE DE FUSION (°C)	1769	1850	1884	1985
RESISTIVITE à 0 °C (Ω cm)	19,91	18,4	20,4	4,3
TEMPERATURE MAXIMALE D'EM- PLOI DE LA RESISTANCE(°C)	1400	1500	1600-1700	1850-1900

TABLEAU N° (8)

CARACTERISTIQUES DES RESISTANCES EN MOLYBDENE, TUNGSTENE,
TANTALE.

PROPRIETES	MO	W	Ta
DENSITE	9,6-10,28	19,32	16,65
TEMPERATURE DE FUSION (°C)	2610	3410	3000
TEMPERATURE MAXIMALE D'UTILISATION (°C)	1500 - 1700	2200-2800	2400
RESISTIVITE à 0°C (Ω cm)	5,17	5,5	12,4

TABLEAU N° (9)

CARACTERISTIQUES DES RESISTANCES EN CARBONE

CARACTERISTIQUES	CARBONE AMORPHE	GRAPHITE SYNTHETIQUE
DENSITE REELLE	1,8	2,25
DENSITE APPARENTE	1,1	1,56
RESISTIVITE (Ω cm)	7000 à 8000	800 à 1050
TEMPERATURE D'EMPLOI (°C)	2200 -2300	2600 sous vide 2800 sous argon 3000 sous helium
TEMPERATURE DU DEBUT D'OXYDATION (°C)	400	500

BIBLIOGRAPHIES

- [1] TRANSMISSION DE LA CHALEUR ET THERMODYNAMIQUE
- KREITH 1964 -
- [2] LES FOURS METALLURGIQUES -NADJAFOV 1983 -
- [3] TRANSMISSION DE LA CHALEUR -Mc ADAMS 1964 -
- [4] ELECTROTHERMIE INDUSTRIELLE -ORFEUIL 1980 -
- [5] INITIATIONS AUX TRANSFERTS THERMIQUES -SACCADURA 1973 -
- [6] ENCYCLOPEDIE DES SCIENCES INDUSTRIELLES -QUILLET 1984 -
- [7] LES FOURS ELECTRIQUES INDUSTRIELS TOME I,II
-PASCHKIS 1973 -
- [8] THERMIQUES APPLIQUEES AUX FOURS INDUSTRIELS
-HEILIGENSTAEDT 1973
- [9] INFORMATIQUE INDUSTRIELLE TOME I,II,III
-NUSSBAUMER 1986-
- [10] TECHNIQUES DE L'INGENIEUR
- [11] LES CAPTEURS -ASCH 1983-

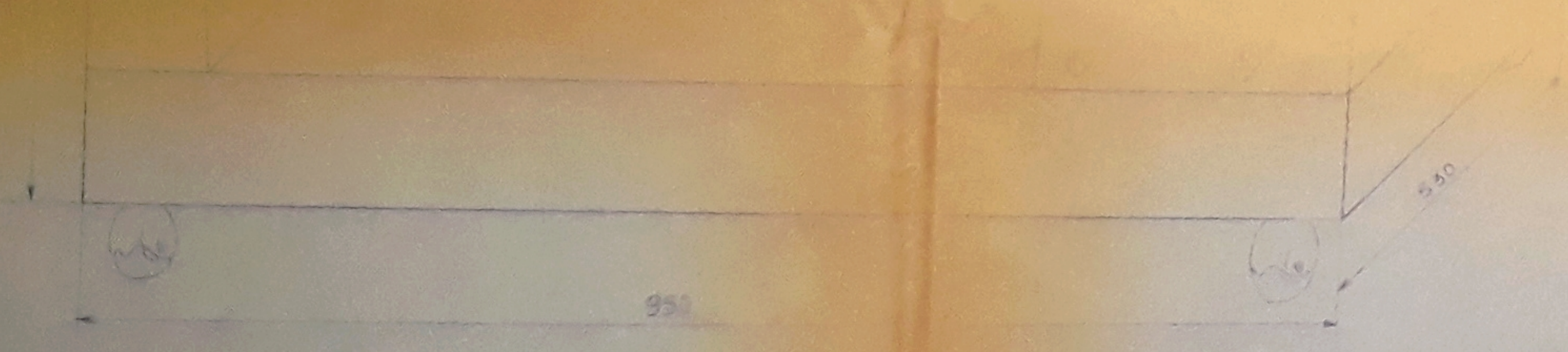
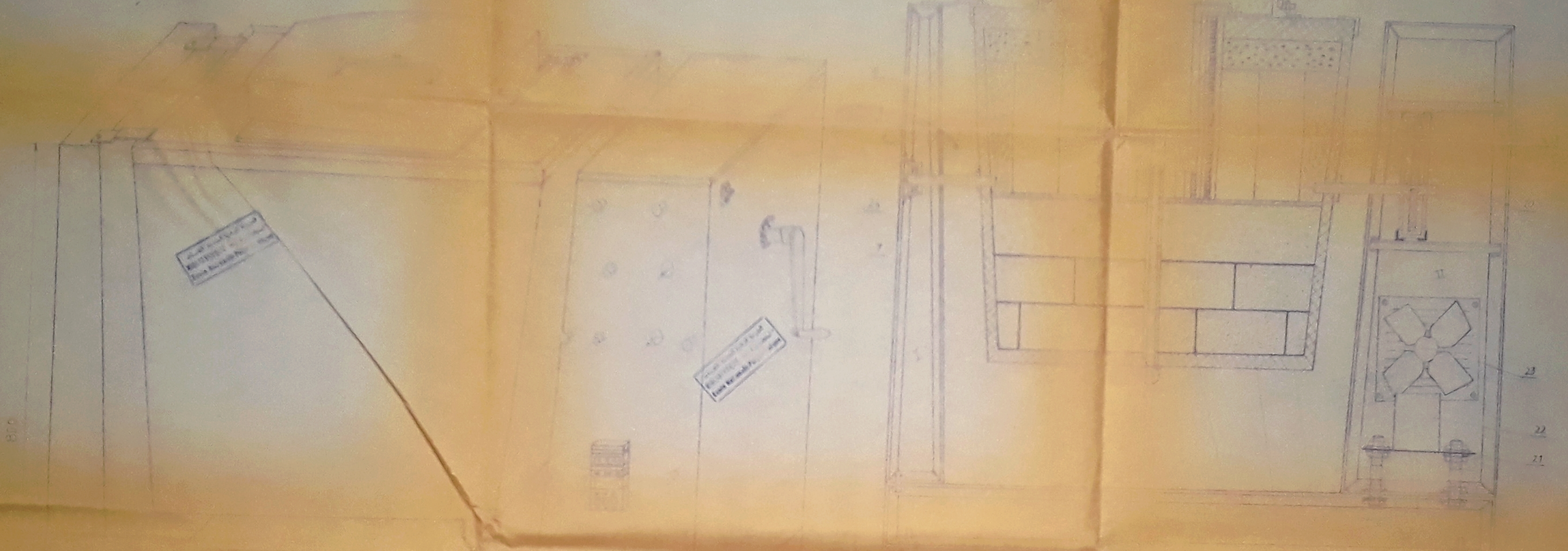
Plan 10/20

المعهد الوطني للبحوث والدراسات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
الوطنية للبحوث والدراسات

المعهد الوطني للبحوث والدراسات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
الوطنية للبحوث والدراسات

المعهد الوطني للبحوث والدراسات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
الوطنية للبحوث والدراسات

المعهد الوطني للبحوث والدراسات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
الوطنية للبحوث والدراسات



- 25 4 Cornières
- 24 1 Support de l'arbre
- 23 1 Ventilateur
- 22 1 Relais
- 21 1 Support des matériaux électriques
- 20 1 Système de basculement
- 19 1 bâti (I & II)
- 18 1 isolant thermique
- 17 1 Porte réfractaire
- 16 1 isolant thermique
- 15 1 bec de coulée
- 14 1 thermocouple
- 13 1 résistance
- 12 1 Support pour résistances

Quantité	Designation	Matériau
1	creneau	graphite
1	Porte réfractaire	Béton
4	réfractaire	alumineux (C)
6	réfractaire	40% Al ₂ O ₃
1	Béton ciment, gâchée	Béton
1	Béton réfractaire	Béton
1	Béton ciment, gâchée	Béton
12	Brigues réfractaire	40% Al ₂ O ₃
1	Coaks	Poudre
1	Isolant thermique	laine de verre
1	enceinte de four	inox 18/8

Juin 1970 N° 1 BENHASSINE Karim - AHMANACHE Yahia
 Ecole Nationale Polytechnique
 FOUR DE FUSION ELECTRIQUE A 630
 Echelle 1/5 A Perspective B coupe transversale

