

ECOLE NATIONAL POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

8/91

## THESE DE MAGISTER

Presentée Par : MERZAK LARIBI

LE 18 JUIN 1991

### INTITULÉE

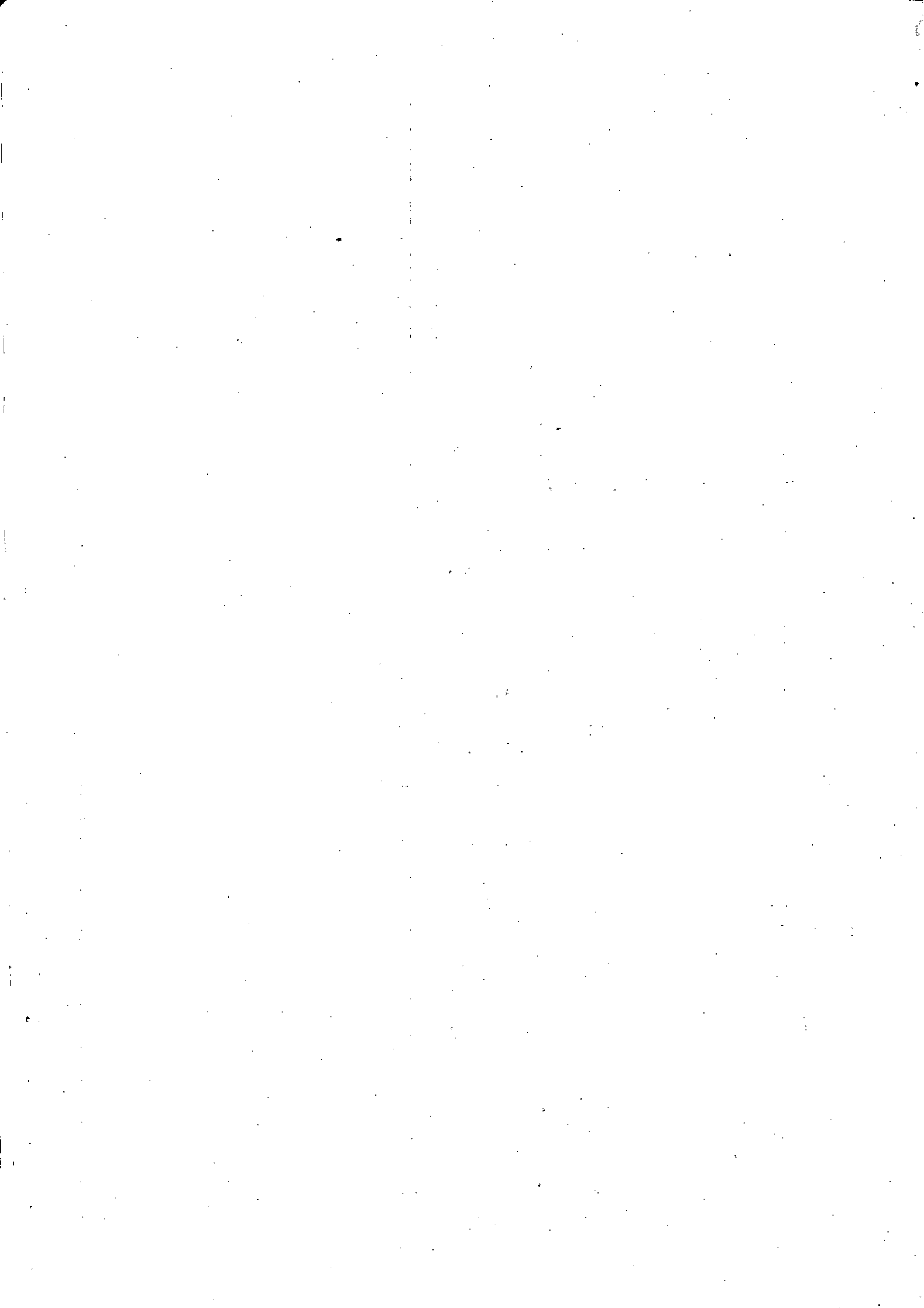
ETUDE COMPARATIVE DE LA DISTRIBUTION  
DE TEMPERATURE D'UNE PIECE  
CYLINDRIQUE SUBISSANT UN TRAITEMENT  
THERMIQUE EN FONCTION DE DIFFERENTS  
TYPES DE CHAUFFAGE

DEVANT LE JURY :

Président : Pr A. GAHMUSSE.

Examineurs Mr N. MESRATI  
Mr R. DJELLOULI  
Mr P. HELLAL  
Mr A. GUEDJATI

Rapporteur : Mr D. PHAM KIM.



ECOLE NATIONAL POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

THESE DE MAGISTER

Presentée Par : MERZAK LARIBI

LE 18 JUIN 1991

INTITULÉE

ETUDE COMPARATIVE DE LA DISTRIBUTION  
DE TEMPERATURE D'UNE PIECE  
CYLINDRIQUE SUBISSANT UN TRAITEMENT  
THERMIQUE EN FONCTION DE DIFFERENTS  
TYPES DE CHAUFFAGE

DEVANT LE JURY :

Président : Pr A.GAIMOUSSE.

Examineurs Mr N.MESRATI  
Mr R.DJELLOULI  
Mr P.HELLAL  
Mr A.GUEDJATI

Rapporteur : Mr D.PHAM KIM.

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

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse Mr J.Karpati pour son aide fructueuse et pour ses prodigieux conseils.

Je remercie également Mr K.Pham pour les efforts qu'il n'a cessé de fournir en vue de mener à bien et à terme ce travail.

Mes remerciements vont également aux professeurs A.Biro et F.Tranta pour m'avoir accueilli dans leurs laboratoires à l'université polytechnique de Miskolc en Hongrie où a été effectuée la partie expérimentale de notre étude.

Que mon ami M.Katir trouve ici mes remerciements pour son assistance continue et son soutien moral.

J'exprime ma gratitude au Professeur A.Gahmousse pour la présidence du jury ainsi qu'à Mrs N.Mesrati, R.Djellouli, F.Hellal, A.Guedjati et K.Pham d'avoir accepté de juger ce travail.

Mon profond respect va à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

# SOMMAIRE

<b>CHAPITRE I:</b>	<b>INTRODUCTION</b>	. . . . .	1
<b>CHAPITRE II:</b>	<b>TECHNIQUES EXPERIMENTALES</b>	. . . . .	5
II-1:	Introduction	. . . . .	6
II-2:	Matériau étudié	. . . . .	6
II-3:	Forme et dimensions des éprouvettes	. . . . .	7
II-4:	Traitement thermique réalisé	. . . . .	7
II-5:	Types de fours utilisés	. . . . .	10
II-6:	Enregistreur de températures	. . . . .	14
II-7:	Perforation de l'éprouvette	. . . . .	16
II-8:	Fabrication et mise en place des thermocouples	. . . . .	17
II-9:	Enfournement des éprouvettes	. . . . .	21
II-10:	Défournement des éprouvettes	. . . . .	23
II-11:	Modes de chauffage utilisés	. . . . .	23
II-11-1:	Chauffage type "A"	. . . . .	24
II-11-2:	Chauffage type "B"	. . . . .	24
II-11-3:	Chauffage type "C"	. . . . .	27
II-11-4:	Chauffage type "D"	. . . . .	27
II-12:	Schéma du dispositif expérimental	. . . . .	30
<b>CHAPITRE III:</b>	<b>PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX.</b>	. . . . .	31
III-1:	Introduction	. . . . .	32
III-2:	Techniques et équipements mis en oeuvre	. . . . .	34
III-2:	<b>Chauffage type " A "</b>	. . . . .	38
III-2-1:	Résultats thermiques	. . . . .	39
III-2-2:	Etude métallographique	. . . . .	41

III-2-3:	Etude de décarburation	. . . . .	42
III-2-4:	Essais de dureté	. . . . .	43
<b>III-3:</b>	<b>Chauffage type " B "</b>	. . . . .	<b>44</b>
III-3-1:	Résultats thermiques	. . . . .	45
III-3-2:	Etude métallographique	. . . . .	47
III-3-3:	Etude de décarburation	. . . . .	48
III-3-4:	Essais de dureté	. . . . .	49
<b>III-4:</b>	<b>Chauffage type " C "</b>	. . . . .	<b>50</b>
III-4-1:	Résultats thermiques	. . . . .	51
III-4-2:	Etude métallographique	. . . . .	53
III-4-3:	Etude de décarburation	. . . . .	54
III-4-4:	Essais de dureté	. . . . .	55
<b>III-5:</b>	<b>Chauffage type " D "</b>	. . . . .	<b>56</b>
III-5-1:	Résultats thermiques	. . . . .	57
III-5-2:	Etude métallographique	. . . . .	59
III-5-3:	Etude de décarburation	. . . . .	60
III-5-4:	Essais de dureté	. . . . .	61
<b>III-6:</b>	<b>Analyse des résultats expérimentaux</b>	. . . . .	<b>62</b>
	<b>Conclusions</b>	. . . . .	<b>65</b>
<b>CHAPITRE IV:</b>	<b>MODELISATION MATHEMATIQUE</b>	. . . . .	<b>66</b>
IV-1:	Introduction	. . . . .	67
IV-2:	Position du problème	. . . . .	68
IV-3:	Principes de fonctionnement d'un four de traitement thermique	. . . . .	70
IV-4:	Equation différentielle de conduction	. . . . .	75
IV-4-1:	Conductivité thermique " k "	. . . . .	76
IV-4-2:	Chaleur spécifique " C <sub>p</sub> "	. . . . .	78
IV-5:	Discrétisation de l'équation différentielle	. . . . .	78
IV-6:	Discrétisation du domaine d'étude	. . . . .	83
IV-7:	Conditions initiales	. . . . .	87

IV-8:	Conditions aux limites . . . . .	87
IV-8-1:	Linéarisation de l'équation du rayonnement .	89
IV-8-1-1:	Détermination du coefficient d'écoulement par convection . . . . .	90
IV-8-1-2:	Détermination du facteur d'échange par rayonnement . . . . .	91
IV-9:	Etablissement du système d'équations . .	92
IV-9-1:	Principe de la méthode A.D.I . . . . .	93
IV-9-2:	Mise en équations . . . . .	93
IV-9-3:	Résolution par la méthode T.D.M.A . . .	108
IV-10:	Organigramme général . . . . .	111
IV-11:	Possibilités et limites du logiciel . . .	115

**CHAPITRE V: PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS**

	<b>NUMERIQUES . . . . .</b>	<b>117</b>
V-1:	Présentation des résultats numériques . .	118
V-1-1:	Chauffage type "A" . . . . .	119
V-1-2:	Chauffage type "B" . . . . .	122
V-1-3:	Chauffage type "C" . . . . .	125
V-1-4:	Chauffage type "D" . . . . .	128
V-2:	Analyse des résultats numériques . . . .	131
	<b>Etude comparative . . . . .</b>	<b>132</b>
	<b>CONCLUSIONS GENERALES . . . . .</b>	<b>133</b>
	<b>Reférences bibliographiques . . . . .</b>	<b>135</b>
	<b>Annexes . . . . .</b>	<b>142</b>

**CHAPITRE I**

**INTRODUCTION**



Depuis plusieurs décades, de nombreux progrès ont été accomplis en chauffage industriel et les opérations thermiques se sont considérablement développés. Ceci a permis d'acquérir un ensemble de techniques à même de fournir des produits et des prestations très rentables.

Naguère, dans l'industrie, on attachait moins d'importance à la puissance des fours. Actuellement, on exige d'avantage de performances pour une bonne production et un meilleur rendement, performances qui nécessitent une étude réellement plus précise des fours et de leurs fonctionnements. A ce développement doit correspondre la vérification des données de base et le remaniement des méthodes de calcul [1].

Aussi, l'avènement des ordinateurs et de l'informatique moderne est d'une aide inestimable dans l'étude des procédés, la compréhension des phénomènes, l'évaluation des résultats, le contrôle aisé des différents paramètres ainsi que la rapidité d'exécution et la facilité du choix et du "design" des fours et autres installations thermiques.

Par ailleurs, le choix d'un alliage métallique et des traitements qu'il faut lui faire subir, dépendent des sollicitations pratiques de son emploi. A cet effet, des opérations de traitements thermiques sont très souvent utilisées pour conférer aux matériaux métalliques des propriétés mécaniques requises pour des conceptions données, et l'emploi des fours pour la réalisation de cette tâche s'avère sine qua non.

Ceci étant, un fait fondamental demeure: Comment tirer le meilleur parti des vastes possibilités d'un four et de réaliser par conséquent le traitement thermique le moins onéreux tout en assurant une meilleure qualité du produit ?

Il est évident qu'une connaissance approfondie des matériaux, une utilisation réfléchie du four et un choix judicieux du mode de chauffage conduisent nécessairement à une plus grande capacité de production, une possibilité d'économie de l'énergie, un meilleur rendement ainsi que des caractéristiques mécaniques adéquates du produit traité.

Partant de ces considérations, l'objet de notre travail (constitué de deux parties) repose principalement et d'une part sur les travaux expérimentaux suivants:

- Faire subir à un alliage bien précis un traitement thermique adéquat sous l'influence respective de différents modes de chauffage.

- Contrôler pour chaque cas, l'évolution de la température de certains points judicieusement choisis de la pièce par l'intermédiaire de thermocouples et autres équipements spécifiques.

- Mettre en évidence les facteurs économiques mis en jeu ainsi que le temps nécessaire à la réalisation du traitement, relativement à chaque mode de chauffage.

- Procéder à une étude comparative des propriétés mécaniques résultantes après chaque traitement thermique.

Le but essentiel de cette étude expérimentale est naturellement varié: on vise en premier lieu la détermination du type de chauffage le plus rationnel et le plus rentable en vue d'augmenter la productivité du four. En deuxième lieu, il porte sur une meilleure connaissance de certains phénomènes thermiques complexes encore peu étudiés.

D'autre part, et dans le souci d'assurer le succès de la méthodologie sur l'étude d'un tel processus industriel, le deuxième volet de notre travail consiste en la modélisation mathématique du processus expérimental.

Cette simulation est basée sur l'approche par des modèles mathématiques puissants qui ont nécessité des analyses préalables approfondies des phénomènes et des méthodes d'investigation.

Cette étude a été menée en étroite liaison avec le travail expérimental en profondeur.

Une fois le modèle mathématique établi, un logiciel informatique est mis au point. Son objectif premier est de déterminer le profil de température dans la pièce au cours de chaque chauffage ainsi que le temps d'homogénéisation requis. Il permettrait également à partir de certaines connaissances préliminaires, l'obtention rapide et à moindres frais des informations nécessaires au contrôle et au perfectionnement des techniques de chauffage.

Enfin, la compatibilité des résultats mathématiques et expérimentaux validerait le logiciel élaboré, justifierait son efficacité et permettrait son utilisation ultérieure pour l'analyse d'autres procédés similaires. Ainsi pourrait-on prévoir leurs comportements sans avoir à recourir aux expériences généralement coûteuses, simplement en tenant compte des paramètres mis en jeu dans le nouveau procédé à étudier.

CHAPITRE II

\*\*\*\*\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*\*\*\*\*

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

## II-1 Introduction :

Le choix du matériau étudié, de sa forme, de ses dimensions ainsi que son traitement thermique sont l'aboutissement de recherches bibliographiques et d'informations recueillies au niveau des entreprises métallurgiques et de construction mécanique.

Une première analyse montre que l'acier tient une place considérable au coeur des besoins quotidiens de l'industrie, parcequ'on peut faire varier ses propriétés dans de larges limites en agissant, d'une part sur sa composition chimique et, d'autre part en mettant en oeuvre des traitements thermiques appropriés. Cet alliage offre également la possibilité de fabriquer des pièces de différentes formes et de n'importe quelles dimensions.

## II-2 Matériau étudié :

Pour les raisons sus-citées d'une part, et pour sa disponibilité et son utilisation préférentielle pour la fabrication de pièces mécaniques courantes d'autre part, nous avons utilisé au cours de nos essais expérimentaux un acier XC 42

Une analyse spectrochimique effectuée sur un échantillon prélevé sur le matériau en question a révélé la composition chimique suivante:

% des éléments les plus importants:	C	Mn	Si	S	P	Al
	0.45	0.68	0.26	0.021	0.017	0.05

### **II-3 Forme et dimensions des éprouvettes :**

La deuxième analyse des informations montre que la forme cylindrique est utilisée dans une large mesure sans limites de dimensions.

Pour cela, six (06) éprouvettes de forme cylindrique, d'un diamètre de soixante (60) mm et d'une longueur de cinq cents (500) mm ont été découpé sous lubrification sur une longue barre d'acier XC 42.

Ces dimensions représentent la moyenne de celle d'une gamme de produits cylindriques qu'on retrouve dans différentes industries, en commençant par de simples boulons jusqu'aux grands cylindres de forages pétroliers en passant par une panoplie de pièces de moyennes dimensions (arbres, axes, vérins ...) [15,47].

### **II-4 Traitement thermique réalisé :**

Souvent, et dans le cas où de telles pièces sont employées dans des conditions de choc, de fatigue, de charge statique ou dynamique et de rupture, on recherche une microstructure fine et homogène possédant de bonnes caractéristiques plastiques et des propriétés de résistance convenables.

Le traitement de **Normalisation** constitue un des traitements thermiques recommandés à cet effet. Il conduit (dans le cas d'aciers hypoeutéctoides) à des structures ferrito-perlitiques très homogènes [5,8,9,12].

Ce traitement consiste en un chauffage au dessus de  $A_{c3}$  (cf. figs II.1,2), suivi d'un refroidissement rapide en air calme [8,10,46]. Le temps de maintien de la pièce dans le domaine austénitique doit être court; celle-ci doit séjourner au four

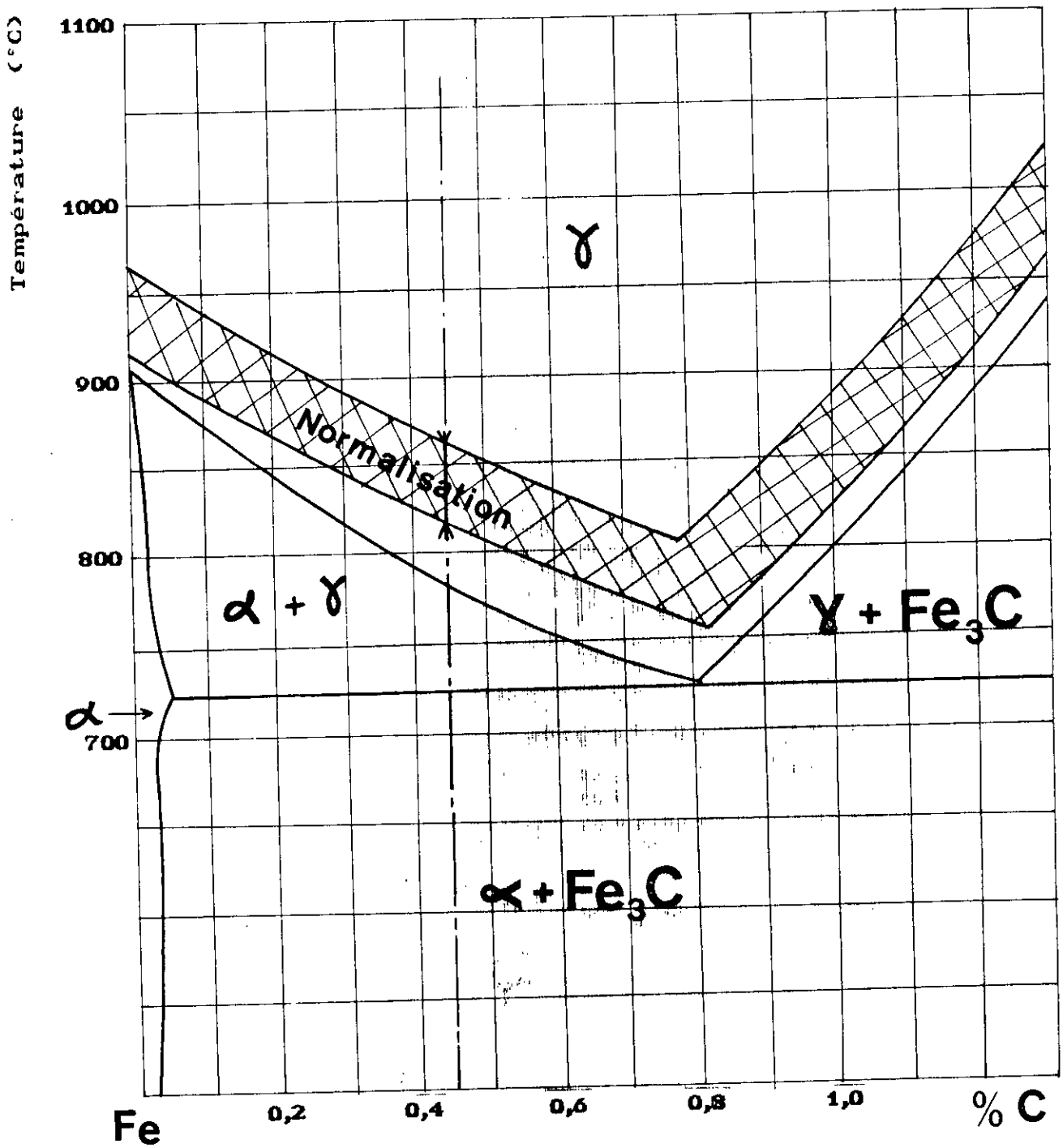


Fig II.1: Determiation de la température de normalisation de l'acier XC 42 par le diagramme Fe - C.

juste le temps suffisant pour permettre une température uniforme dans toute son épaisseur [10,8,9].

Pour l'acier XC 42, on recommande [5,47,46,15] une température de normalisation de 850°C environ.

Les principales caractéristiques mécaniques attendues par ce traitement thermique sont:

- Une structure ferrito-perlitique fine et coaléscée répartie de manière homogène dans toute l'épaisseur de la pièce.
- Une dureté également homogène comprise entre 195 et 210 HB selon les normes [15,10,46].

Une étude détaillée de ces deux propriétés ainsi que le phénomène de décarburation renseignent sur d'autres caractéristiques pouvant évidemment être améliorées, en l'occurrence l'allongement sera augmenté d'environ 15 à 20% et la résistance à la traction est améliorée de 3 à 5 Kgf/mm<sup>2</sup>... [8,15].

#### II-5 Types de fours utilisés :

Deux (02) types de fours industriels ont été utilisés pour l'accomplissement du traitement thermique de normalisation sous les différents modes de chauffage.

Le premier est un four discontinu à chambre. Il permet un chauffage direct sous flux convectif et rayonnant par l'intermédiaire d'un brûleur à gaz situé au niveau de la voûte. Ce four permet d'atteindre rapidement des températures de l'ordre de 1400°C. La fumée est dégagée par une tuyère située en bas de la paroi arrière. Le thermocouple situé sur la paroi supérieure



fait irruption à une quinzaine de centimètres à l'intérieur de la chambre. Celui-ci est relié à un régulateur permettant l'asservissement du four. La porte de ce four peut s'ouvrir et se refermer par l'intermédiaire d'un système pneumatique. (cf. figure II.3).

Suivant la température désirée, le régulateur agit sur un système d'électro-vannes permettant un débit convenable de gaz naturel et d'air, assurant une bonne combustion jusqu'à l'atteinte de la température de consigne. L'entrée d'air et de combustible se fait à des pressions bien déterminées.

Le deuxième appareil est un four électrique à convection forcée (cf figure II.4). Il comporte un ventilateur électrique servant au brassage de l'atmosphère dans l'enceinte en vue d'homogénéiser la température à l'intérieur de celle-ci et d'accélérer le processus de transfert de chaleur entre le corps de chauffe et la charge métallique. Ce ventilateur est fixé sur la paroi supérieure du four, celle-ci sert également de porte à système pneumatique.

Les résistances électriques très puissantes se trouvent installées sur les parois latérales et rayonnent sur des plaques radiantes situées à une dizaine de centimètres en regard. Le thermocouple est placé entre les résistances et les plaques radiantes et est relié au régulateur.

Il convient de signaler que ce four réalise des puissances très élevées. La température qui augmente de manière rapide et homogène dans toute l'enceinte peut atteindre 1200°C.

Trois raisons principales nous ont conduit à utiliser les deux fours sus-cités :

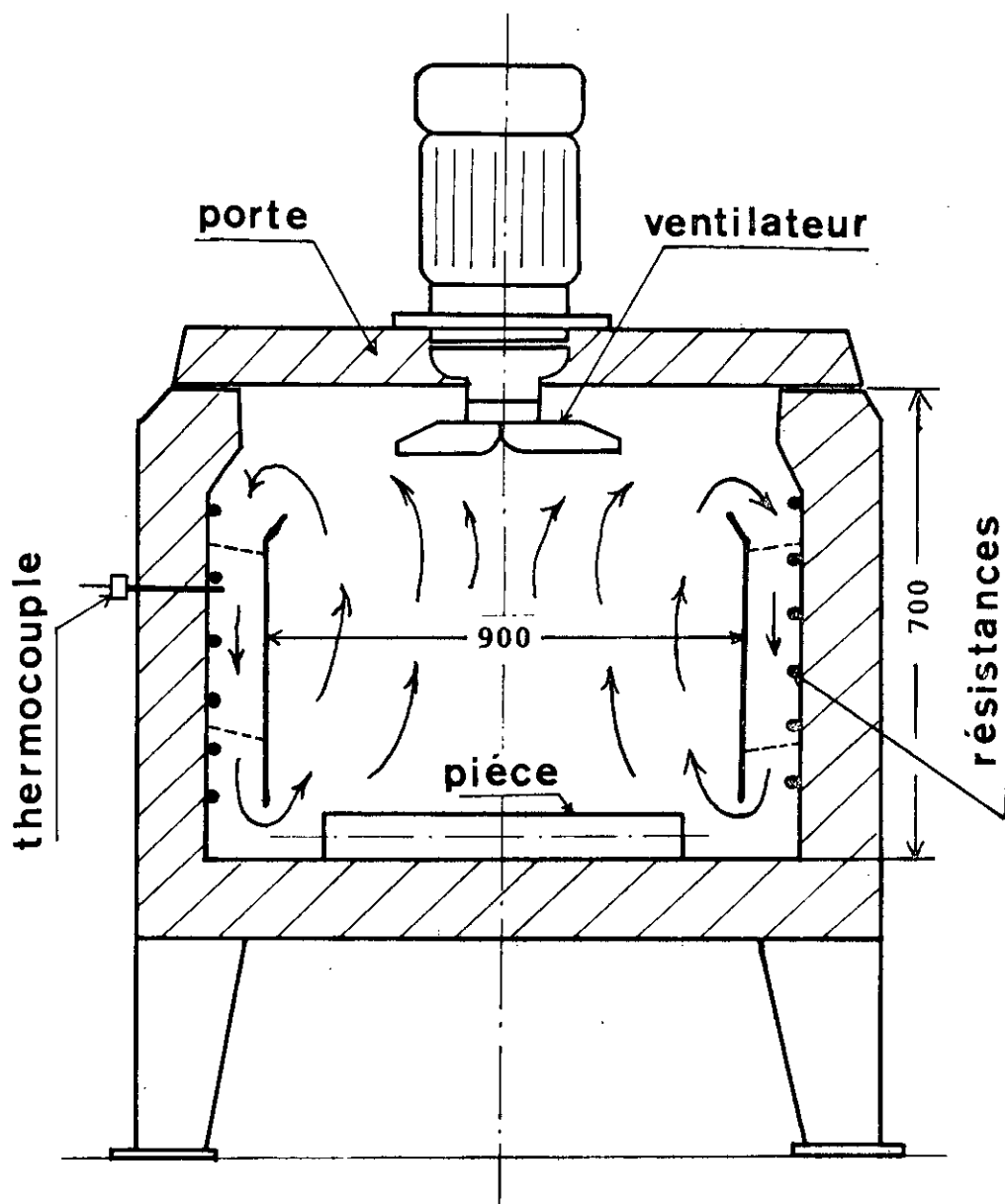


Figure II.4: Représentation schématique du four électrique

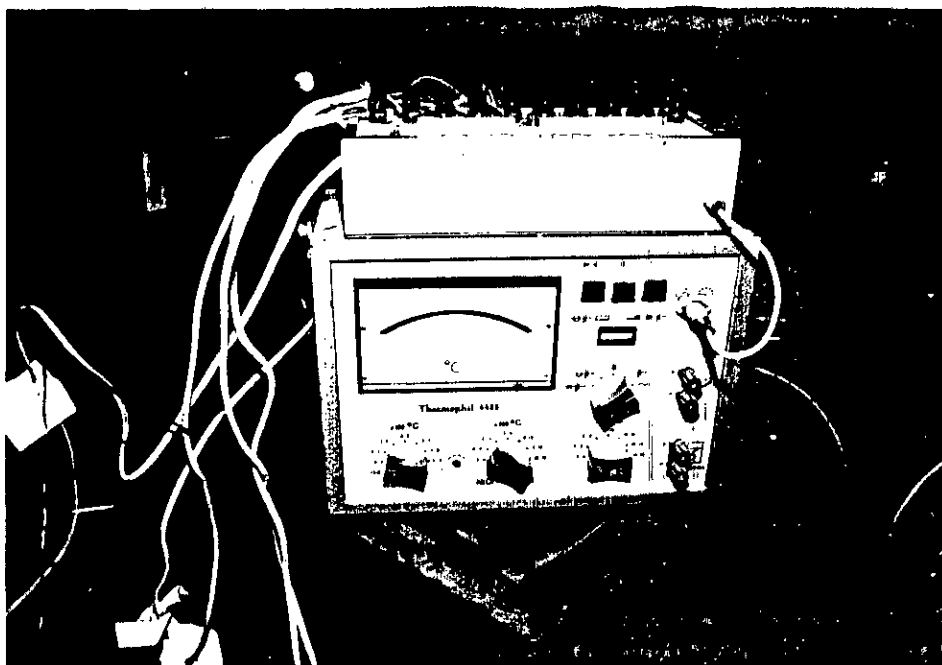


Fig N° II.5 : Dispositif d'enregistrement  
des températures.

Un détail d'importance doit être pris en considération : Le câble de compensation utilisé au cours de nos essais est spécifique aux thermocouples dont nous nous sommes servis et qui sont du type " K " (en Alumel-Chromel). Parmi les trois types de câbles prévus par la norme internationale, a été utilisé celui en Cuivre-Constantan, avec le cuivre pour le positif (Chromel) et le constantan pour le négatif (Alumel) [42,3].

Ces précautions conduisent à une meilleure précision, en effet la norme prévoit pour les thermocouples type " K " une précision de  $2,2^{\circ}\text{C}$  de 0 à  $277^{\circ}\text{C}$  et d'environ 0,5 % de la température mesurée jusqu'à  $1260^{\circ}\text{C}$  [42].

La liaison étant effectuée, des étiquettes portant les désignations TC1, TC2, ..., TC10 représentant les numéros des thermocouples en fonction des points de mesure auxquels ils sont reliés sont collées sur les câbles de compensation. Ces derniers sont par ordre de numérotation reliés aux touches numérotées correspondantes de l'appareil d'enregistrement.

Ainsi, pour connaître instantanément la température des thermocouples, on appuie successivement sur les dix touches de l'enregistreur et on lit systématiquement la température correspondante. IL est bien évident qu'entre la première et la dixième lecture supposées faites au même instant  $t$ , s'écoulera un laps de temps d'au moins vingt (20) secondes. Ce décalage temporel entraîne un décalage thermique se traduisant par un "excès de température" particulièrement pour les thermocouples considérés en dernier lieu. Néanmoins, nous nous sommes arrangés afin de minimiser ces erreurs en commençant les mesures environ dix (10) secondes avant chaque instant considéré et de les terminer 10 secondes après.

#### II-7 Perforation de l'éprouvette :

L'une des six éprouvettes cylindriques préalablement préparées a été perforée à l'aide d'une perceuse électrique. Sept (07) trous d'un diamètre de 2,8 mm ont été ainsi réalisés sur la partie inférieure au niveau de la zone centrale de cette éprouvette.

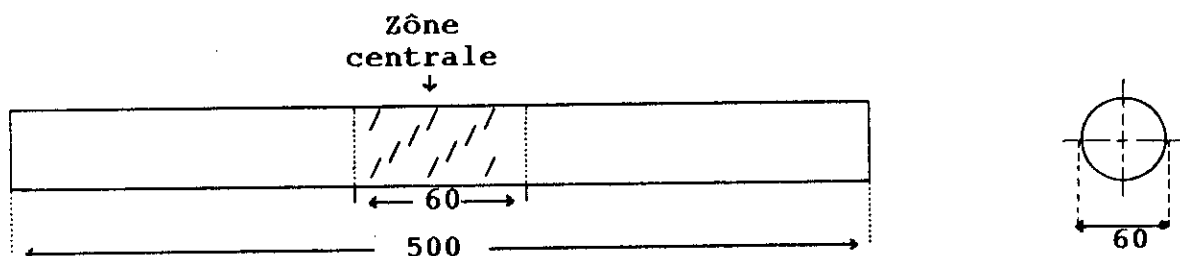


Figure II.6 : Zône de perforation de l'éprouvette.

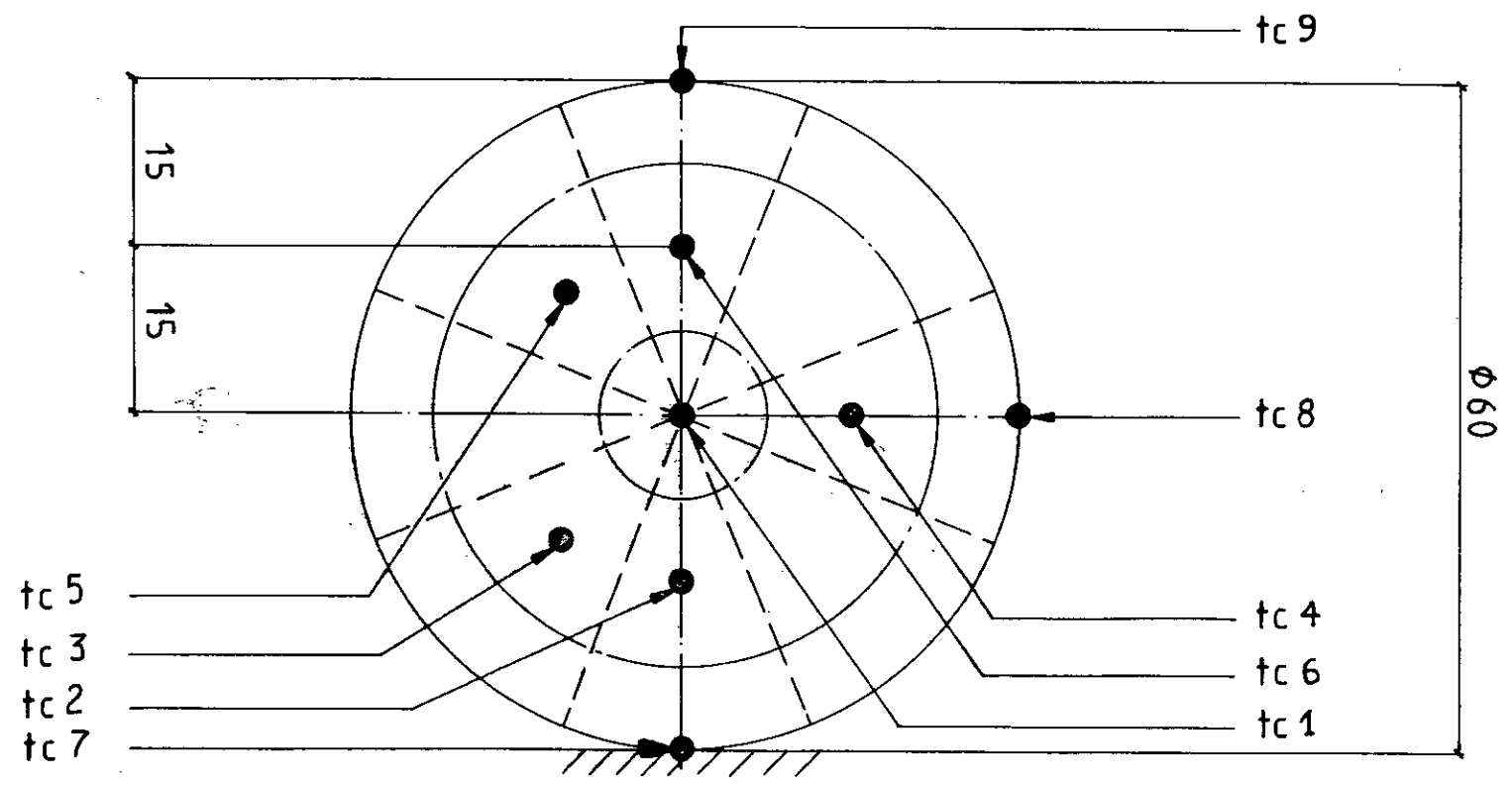


Figure II.7: MISE EN PLACE DES THERMOCOUPLES DANS LA ZONE CENTRALE

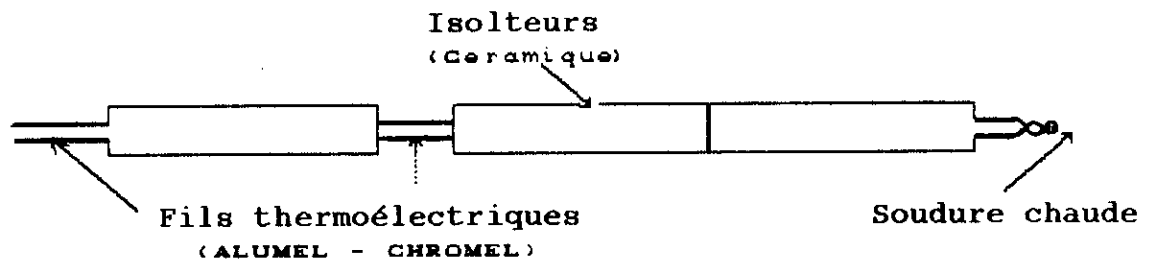


Figure II.9 : Réalisation des thermocouples.

La mise en place des thermocouples dans l'éprouvette se fait en les introduisant soigneusement jusqu'au fond des trous préalablement réalisés. Ils sont ensuite serrés par du de fer très fin afin d'assurer leur immobilité pendant la manipulation.

Les diamètres très réduits et presque égaux des thermocouples ( $\phi = 2,5 \text{ mm}$ ) et des trous ( $\phi = 2,8 \text{ mm}$ ) ont été ainsi choisis pour deux raisons principales:

- Enlever le moins de matière à l'éprouvette en acier XC 42 lors de la perforation, et éviter par conséquent de la remplacer par la céramique du thermocouple. Ces deux matières ont en effet des caractéristiques chimiques et thermiques différentes.
- Permettre aux thermocouples d'épouser parfaitement les trous et d'empêcher ainsi le flux convectif et rayonnant de venir contacter directement les points de mesure. Ce flux "se voit" obligé de se propager normalement par conduction à travers l'épaisseur de l'éprouvette.

## II-9 Enfournement des éprouvettes :

Pour l'exécution du traitement thermique de normalisation en fonction de chaque mode de chauffage, trois (03) éprouvettes sont enfournées à la fois.

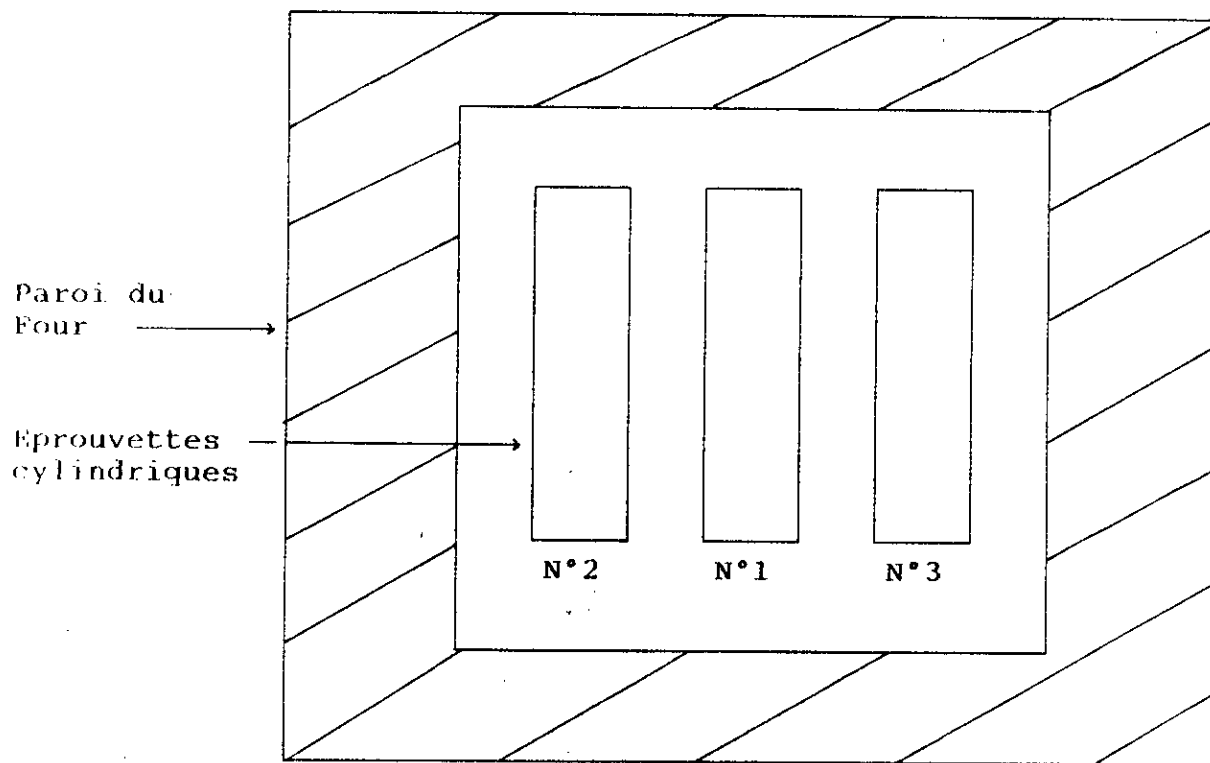
- Celle qui comporte les thermocouples servira pour l'étude de l'évolution et la distribution de température des différents points.

- La deuxième servira pour l'étude des propriétés mécaniques. A cet effet, et à la fin de chaque traitement, on prélèvera sur cette éprouvette des échantillons sur lesquels seront effectués des mesures de dureté, des études métallographique et de décarburation. Cette éprouvette est donc remplacée par une autre qui subira le traitement thermique sous les conditions ultérieures de chauffage, et qui à son tour, sera remplacée...etc.

- La présence de la troisième éprouvette permet d'approcher un cas réel de déroulement de traitement thermique où généralement plusieurs pièces sont enfournées en même temps. Cette éprouvette, n'est par conséquent, pas défournée après chaque traitement.

Les trois éprouvettes sont disposées **horizontalement** dans le four (cf. *figure II.10*). Une distance d'environ 50 mm est laissée entre elles.

Dans le cas d'utilisation du four à gaz, l'entaille d'une brique réfractaire faisant partie de la sole et située sous la porte, a servie pour acheminer l'ensemble des thermocouples vers l'extérieur. Ceux-ci sont recouvert d'un flocon de laine de verre afin d'éviter de les casser lorsque l'on referme la porte, voire d'empêcher toute déperdition thermique éventuelle.



Vue de dessus

Vue de Face

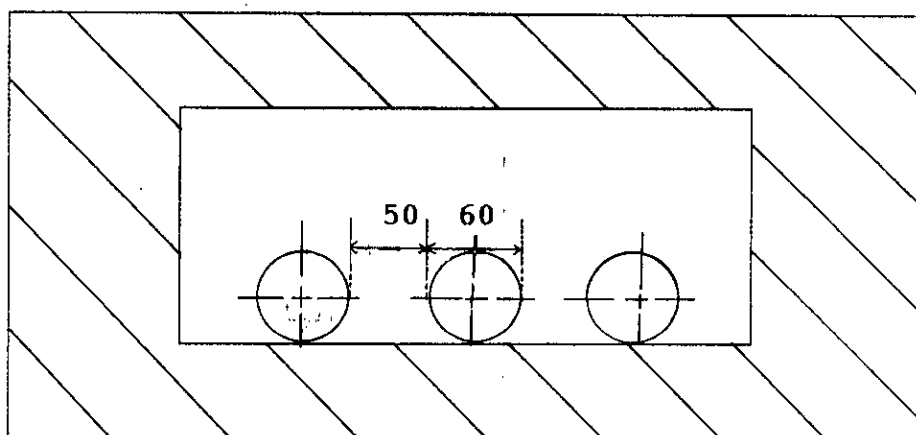


Fig II.10: Disposition horizontale des épreuves à l'intérieur du four.



Dans le cas du four électrique par cône, la porte est pourvue d'un orifice pouvant servir à cette fin.

#### **II-10 Défournement des éprouvettes :**

On procède au défournement des éprouvettes quelques minutes après s'être assuré par le biais de l'enregistreur que tous les points de mesure ont pratiquement atteint une température homogène de 850 °C.

Le four étant éteint, on ouvre la porte et on fait sortir l'éprouvette servant à l'étude des propriétés mécaniques pour la laisser refroidir à l'air calme comme prévu par les consignes du traitement de normalisation.

Très soigneusement, on défourne l'éprouvette "thermocouplée" à l'aide d'une pince géante pour éviter tout déplacement ou cassure des thermocouples. Celle-ci est déposée sur une plate-forme de briques réfractaires où sera poursuivie l'étude du profil de température pendant la phase de refroidissement.

Il sera procédé au nouvel enfournement des éprouvettes qui subiront le traitement de normalisation sous un autre mode de chauffage lorsque l'éprouvette "thermocouplée" et le four seront complètement refroidis.

#### **II-11 Modes de chauffage utilisés :**

Le traitement thermique de normalisation des éprouvettes en acier XC 42 est entamé dès que toutes les étapes de préparation et de vérification des différents matériaux et équipements mis en oeuvre sont franchies.

Il s'effectue à la température de 850°C sous l'influence respective de quatre (04) modes de chauffage.

Les trois (03) premiers, dénomés "A", "B", et "C", sont effectués dans le four à gaz alors que le quatrième du type "D" est réalisé dans le four électrique.

Dans ce qui suit, sera illustré chacun des quatre modes de chauffage en quésition:

#### II-11-1 Chauffage type "A" :

Ce chauffage consiste à ramener graduellement la température du four et par conséquent des éprouvettes, de l'ambiante à 850°C sous un flux normal de convection et de rayonnement. (cf. figure II.11).

La stabilité du four à la température de 850 °C est assurée par le système de régulation.

#### II-11-2 Chauffage type "B" :

C'est un chauffage par palier. Cette opération consiste d'abord en préchauffage de l'ambiante à 650 °C, un maintien pendant une quinzaine de minutes pour permettre à tous les points de se rapprocher de cette température, puis une montée normale jusqu'à 850 °C.

Ce type de chauffage est parfois utilisé en pratique, car, parait-il assure une certaine homogénéité de la température voire, augmente quelque peu la durée de vie des différents constituants du four ( cf. figure II.12).

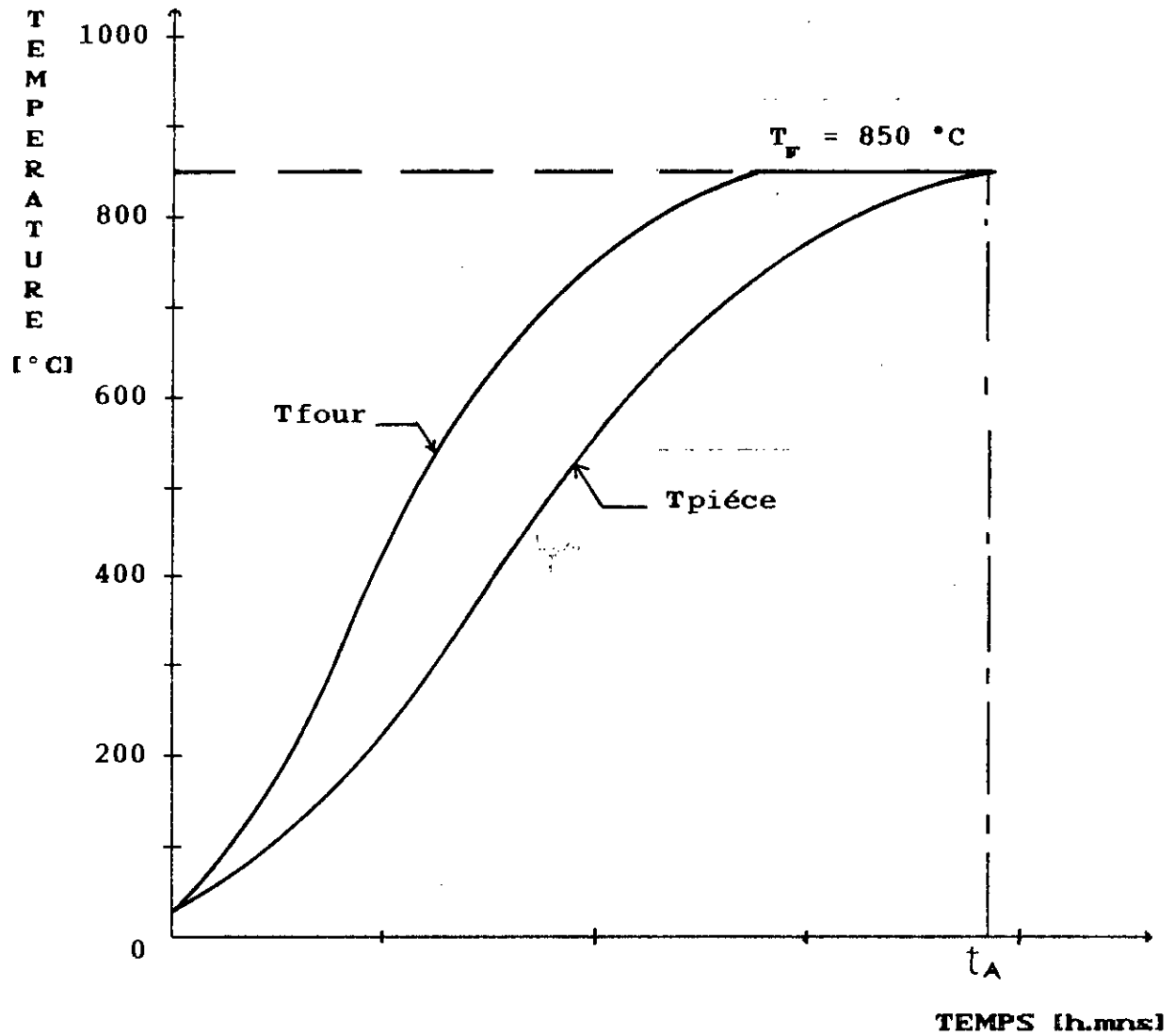


Figure II-11: Chauffage type "A"

- $t_A$  : Temps d'homogénéisation lors du chauffage type "A" (h.mn)
- $T_{pièce}$  : Température moyenne de tous les points de la pièce [°C].
- $T_{Four}$  : Evolution de la température du four [°C] au cours du chauffage type "A".

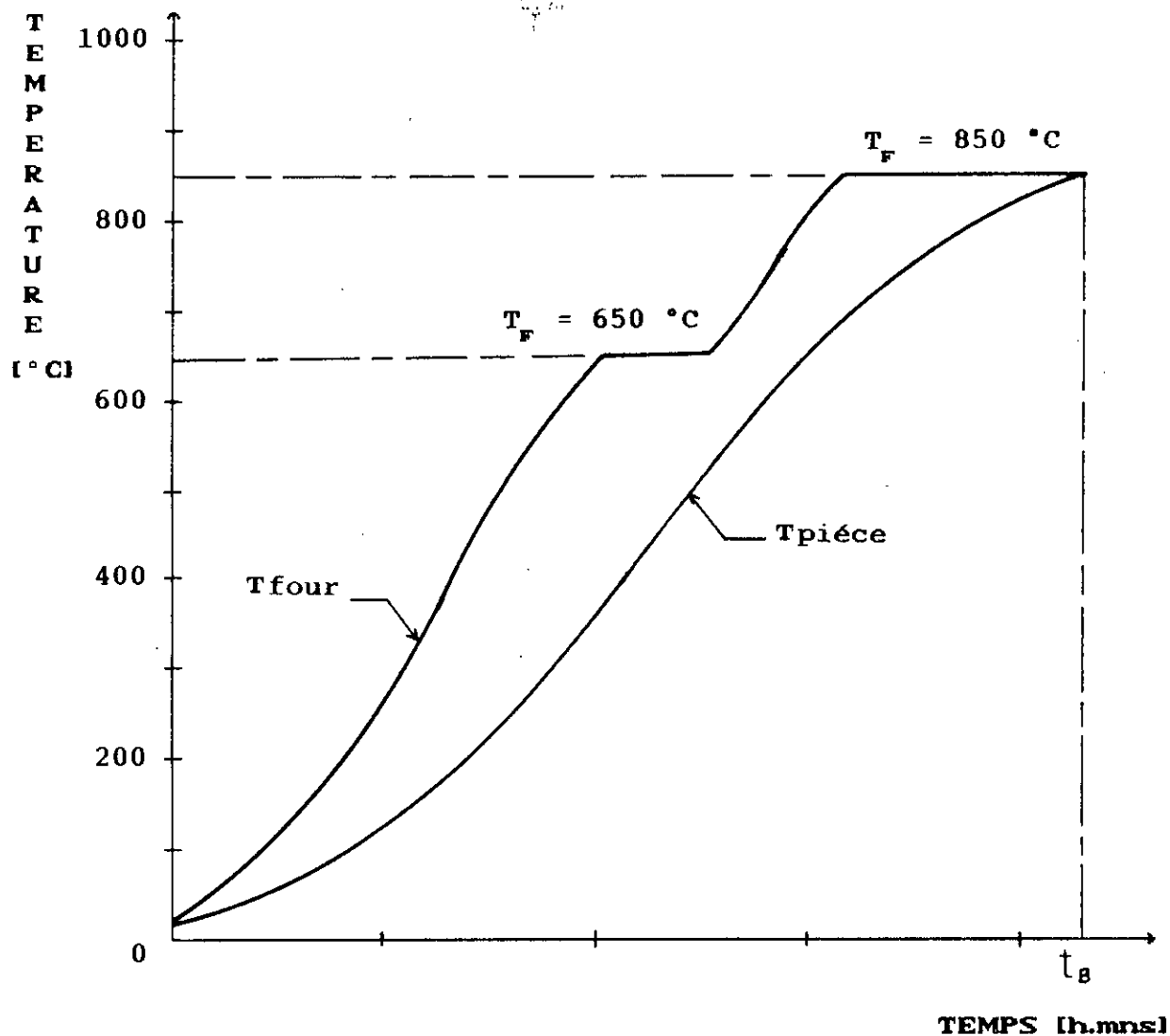


Figure II-12: Chauffage type "B"

- $t_B$  : Temps d'homogénéisation lors du chauffage type "B" [h.mn]  
 $T_{pièce}$  : Température moyenne de tous les points de la pièce [°C].  
 $T_{four}$  : Evolution de la température du four [°C] au cours du chauffage type "B".

### II-11-3 Chauffage type "C" :

Le principe de ce mode consiste en une surchauffe du four à une température de 950 °C, son maintien à cette température pendant une dizaine de minutes, puis le ramener par refroidissement à 850 °C (cf. figure II.13).

Lors du maintien du four à la température de surchauffe ( 950 °C ) pendant le temps considéré ( 10 mns dans notre cas ), il faut incessamment veiller à ce que la température de quelque point que ce soit de l'éprouvette n'excède pas tellement les 850 °C et de sortir par conséquent de la fourchette tolérée par le traitement thermique.

### II-11-4 Chauffage type "D" :

Il est à rappeler que ce mode de chauffage est réalisé dans le four électrique à convection forcée. Il s'agit de monter graduellement en température jusqu'à 850 °C sous les conditions d'un flux de rayonnement et de convection forcée (cf. figure II.14).

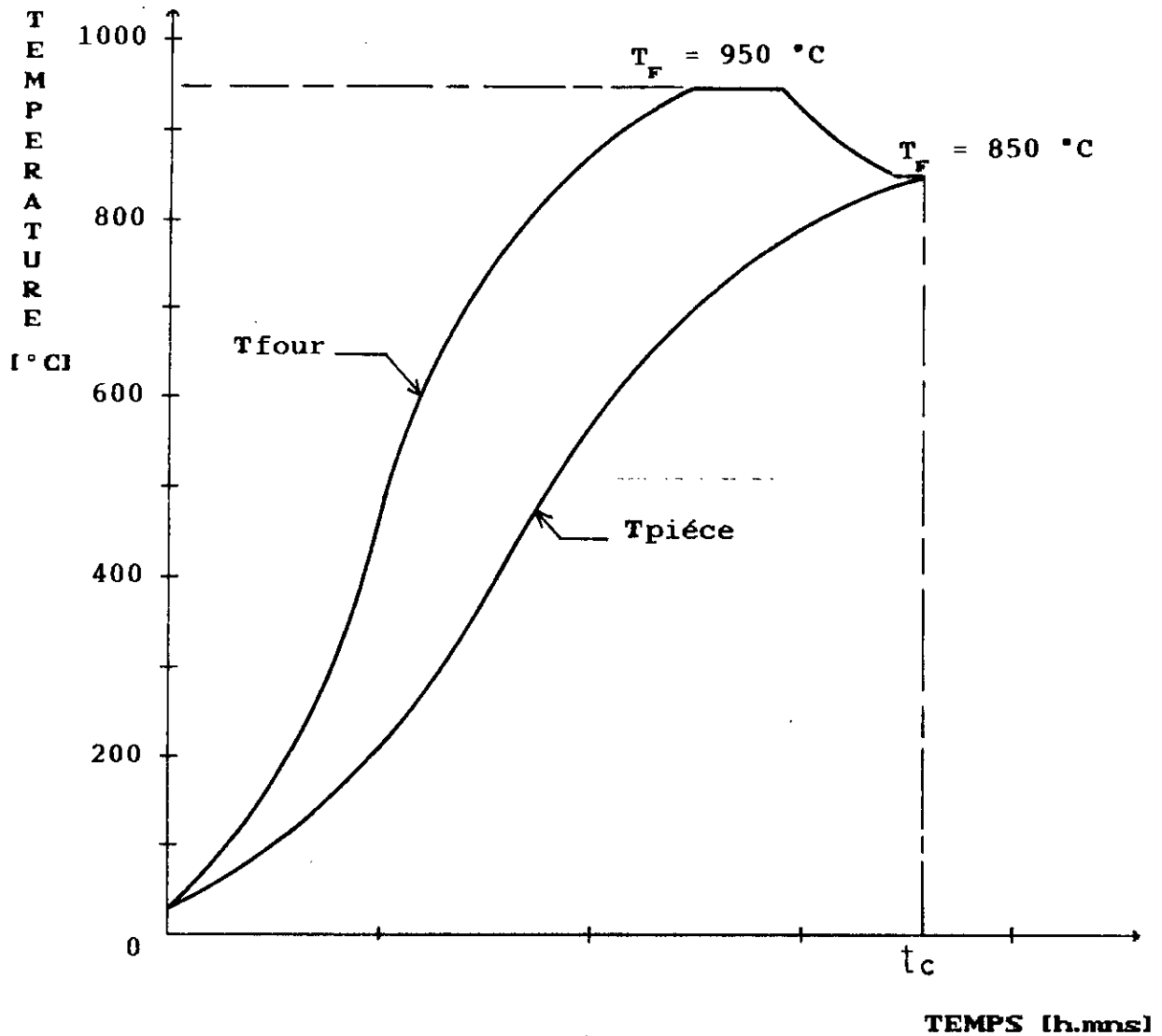


Figure II-13: Chauffage type "C"

- $t_c$  : Temps d'homogénéisation lors du chauffage type "C" [h.mn]
- $T_{pièce}$  : Température moyenne de tous les points de la pièce [°C].
- $T_{Four}$  : Evolution de la température du four [°C] au cours du chauffage type "C".

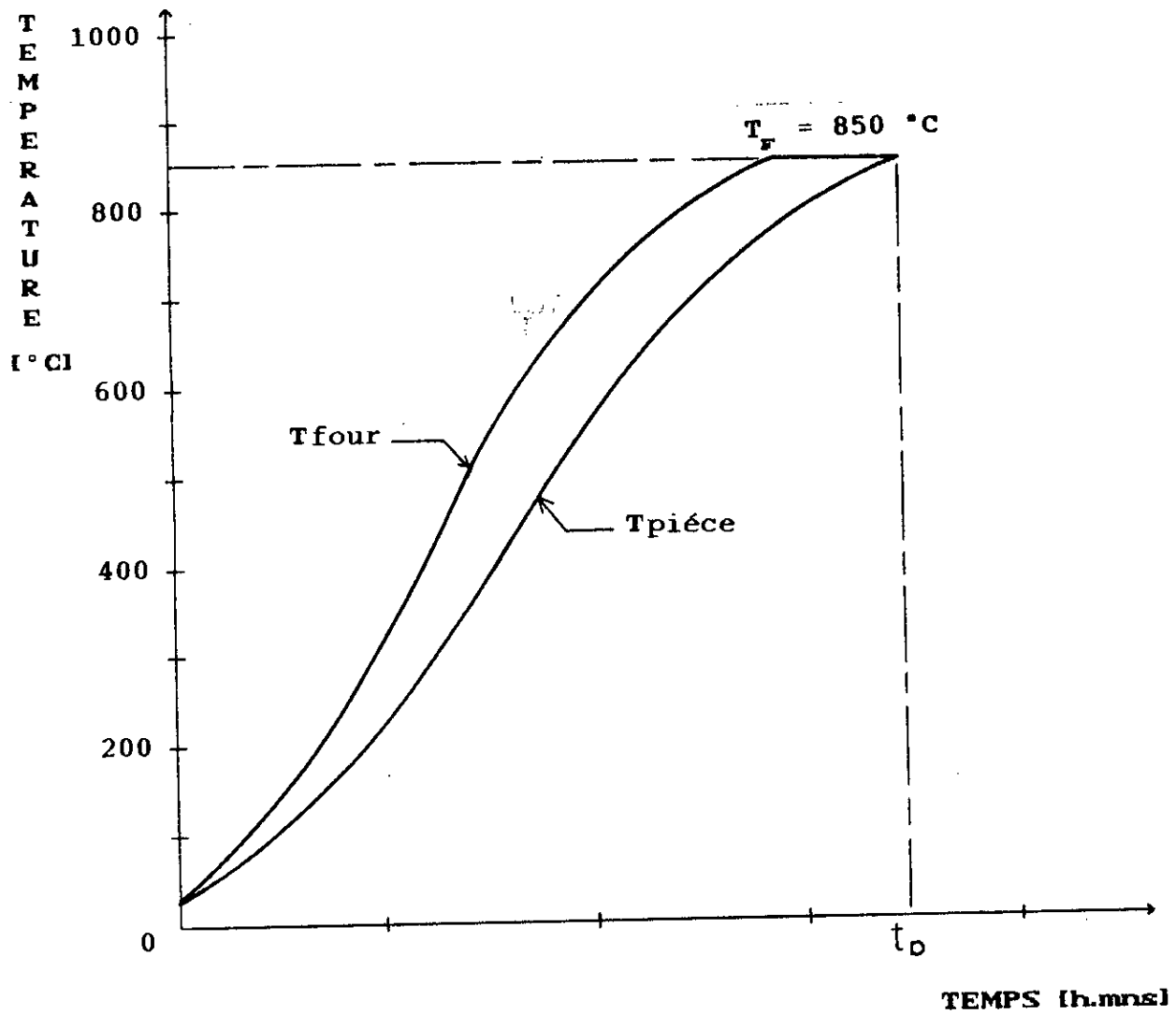
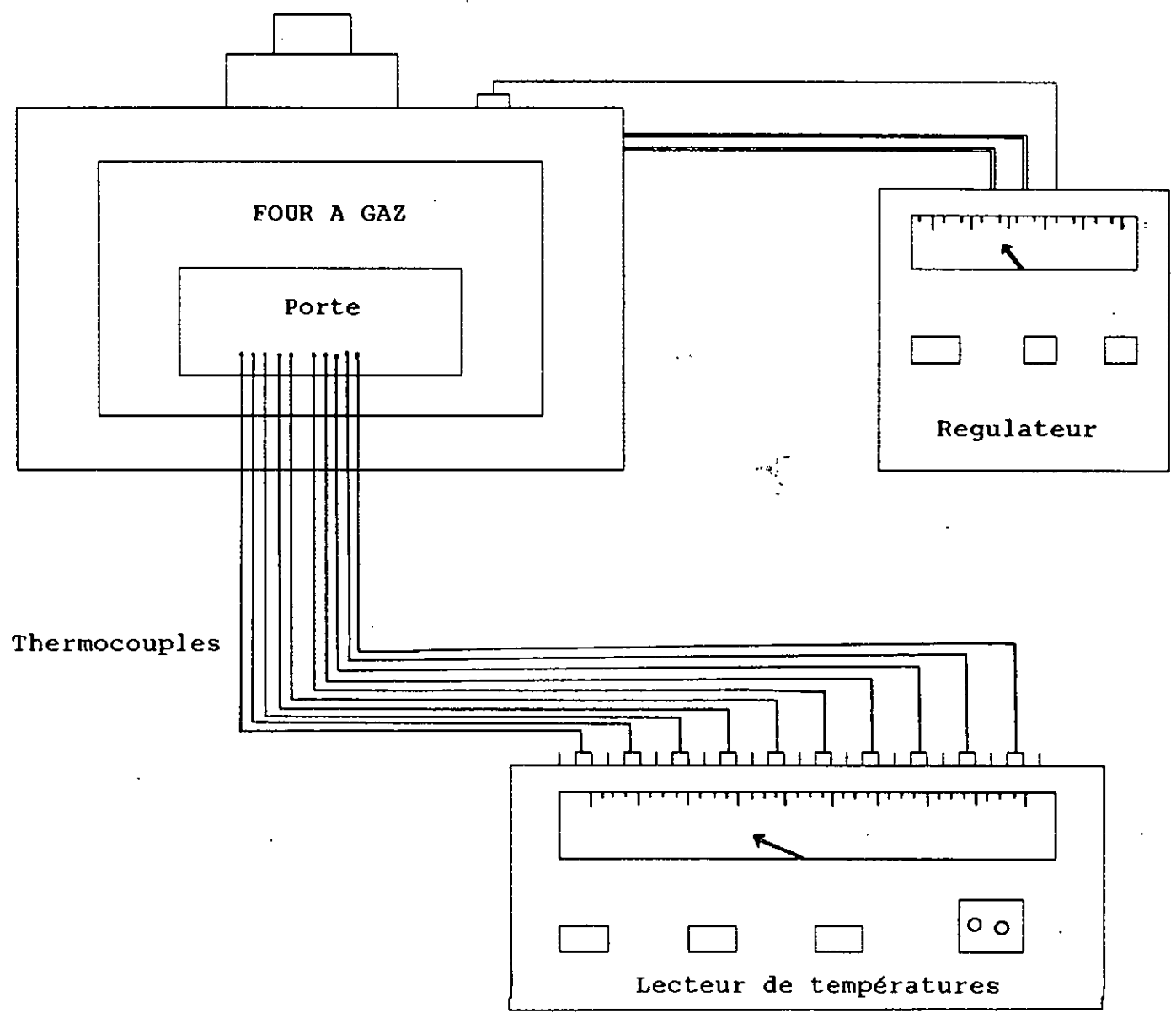


Figure II-14: Chauffage type "D"

$t_D$  : Temps d'homogénéisation lors du chauffage type "D" [h.mn]  
 $T_{pièce}$  : Température moyenne de tous les points de la pièce [°C].  
 $T_{Four}$  : Evolution de la température du four [°C] au cours du chauffage type "D".



Representation schematique du dispositif experimental



**CHAPITRE III**

\*\*\*\*\*  
\*  
\* PRESENTATION ET ANALYSE DES \*  
\* RESULTATS EXPERIMENTAUX. \*  
\*  
\*\*\*\*\*

### III-1 Introduction :

Dans ce qui suit, sera présenté l'ensemble des résultats obtenus par les essais expérimentaux. Pour chaque type de chauffage, on procède à l'établissement de :

- \*\* Un tableau représentant la distribution de la température des différents points de l'éprouvette, prises de 5 en 5 minutes pendant le chauffage.
- \*\* Une représentation graphique de la distribution de température en se conformant au tableau de valeurs sus-cité.
- \*\* Le temps d'homogénéisation. Celui-ci est déterminé par le graphe; il indique que tous les points de l'éprouvette ont pratiquement atteint la température homogène de 850 °C.
- \*\* La consommation de gaz ou d'électricité suivant le cas, à l'aide d'un compteur relié au four.
- \*\* Une étude métallographique illustrée par des photographies de structures d'échantillons appropriés.
- \*\* Une étude de la décarburation de la zone périphérique de l'éprouvette.
- \*\* Un tableau représentant les duretés **HB** effectuées dans des endroits et des zones rigoureusement choisis de l'éprouvette.

Il convient de signaler que les études métallographique, de décarburation et de dureté ont été effectuées sur des échantillons prélevés dans deux (02) zones différentes (zone A, zone centrale) (cf. fig III.1).

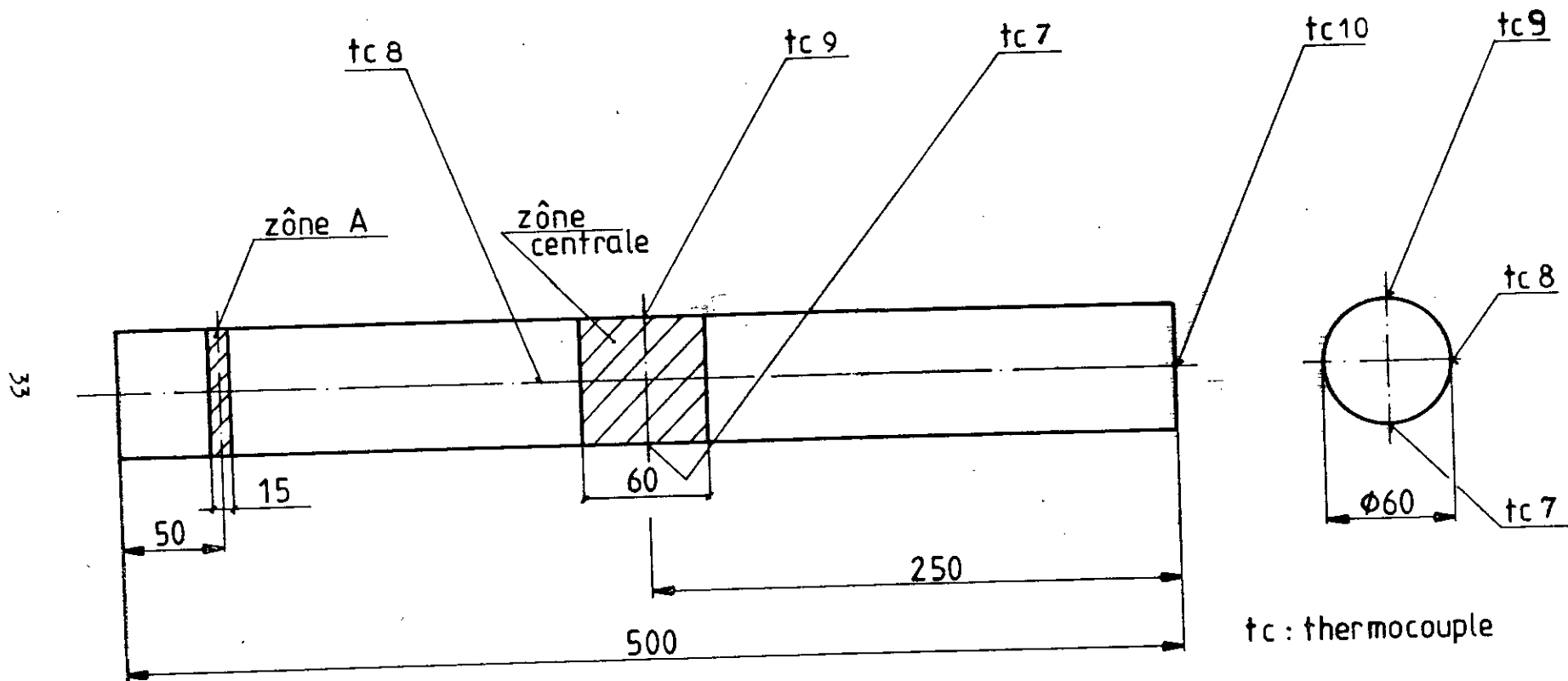


Fig III. 1 : REPARTITION DES ZONES D'ETUDE ET MISE EN PLACE DES THERMOCOUPLES À LA SURFACE DE LA CHARGE

Toutefois, et pour des raisons de reproduction similaire des résultats, nous avons jugé judicieux et non-encombrant de n'illustrer que certaines photographies, valeurs et courbes représentatives de l'ensemble.

### III-2 Techniques et équipements mis en oeuvre :

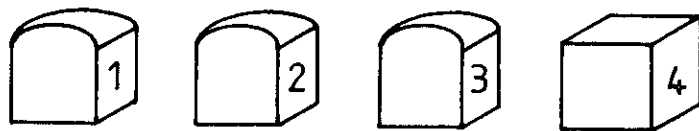
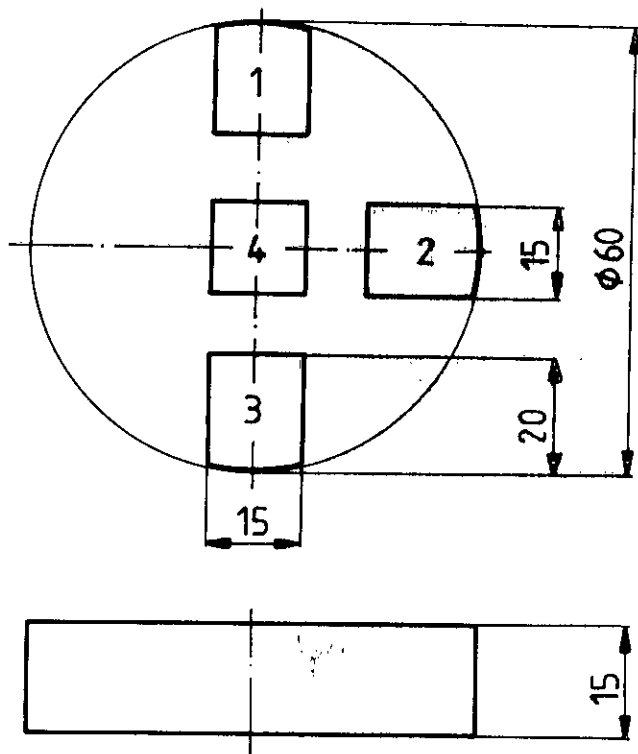
Dans un souci de mener à bien les études en question, des techniques de préparation des échantillons ainsi que des équipements spécifiques ont été mis en oeuvre.

L'étude métallographique et de décarburation ont nécessité pour chaque mode de chauffage huit (08) échantillons prélevés au niveau de la zone centrale et de la zone A à l'aide d'une meule tronçonneuse très précise. Leur taille est d'environ 15 mm de côté (cf. figure III.2).

Après l'opération d'abrasion, on a procédé au polissage de la surface à étudier en utilisant une polisseuse et des disques de polissage à granulométrie croissante, en l'occurrence le 240, 320, 600, 800, et 1000 (ces nombres représentent la quantité de grains de carbure de silicium par  $\text{cm}^2$ .), puis un polissage fin réalisé avec un disque en feutre sur lequel on dépose de la pâte diamantée et du lubrifiant. Cette préparation a permis l'obtention d'une surface exempte de toute rayure, ayant l'aspect d'un miroir, indispensable à la réussite de l'étude en question.

Après un contrôle au microscope optique, la surface à étudier est attaquée avec du NITAL à 5% (5%  $\text{HNO}_3$  et 95%  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) pendant 10 secondes. Elle est ensuite rincée à l'eau et séchée.

Le microscope métallographique qui a servi à l'observation microscopique est doté d'un appareil photographique avec lequel nous avons pris des photographies dans les endroits les plus nets des échantillons .



A,B,C,D = Types de chauffage

1,2,3,4 = Numéros des échantillons

Fig III.2 : PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS POUR L'ETUDE METALLOGRAPHIQUE

Il convient de rappeler brièvement la méthode de calcul du taux de décarburation.

Soient % P et % F, respectivement le pourcentage de perlite et de ferrite présentes dans la zone périphérique de l'éprouvette après le traitement thermique.

On évalue le % P et le % F par l'observation microscopique et on détermine le % C correspondant en sachant que le % C dans la perlite et la ferrite est de 0,8 et 0,02 respectivement.

$$\% C = \% P \cdot 0,8 + \% F \cdot 0,02 \quad (III.1)$$

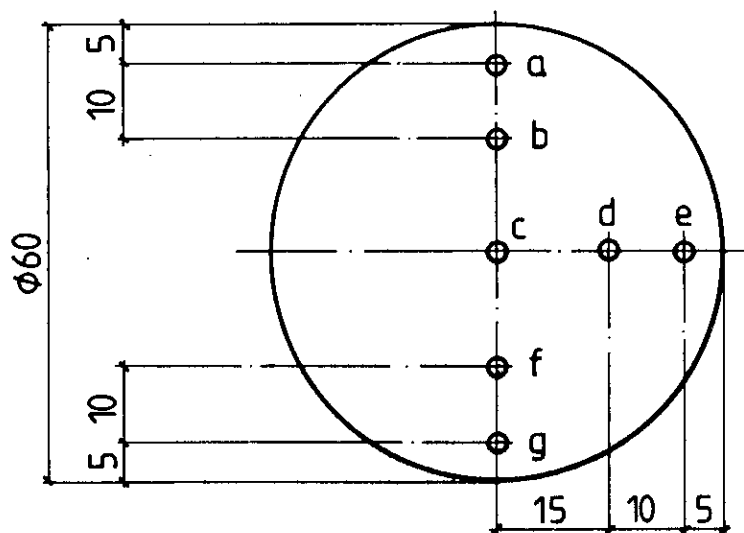
Ce % C est inférieur au % C à l'état initial. La différence rapportée en pourcentage représente justement le taux de décarburation.

L'étude de la dureté par cône, requiert un polissage grossier conduisant à une surface plane. Des points repérant les endroits où s'effectuèrent les mesures ont été tracés sur l'ensemble des deux sections de l'éprouvette. (cf. fig III.3).

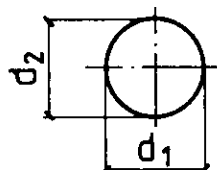
A cet effet, a été utilisé un duromètre pour essais BRINELL avec un poids de 750 grs et une bille de 5 mm de diamètre répondant aux normes.

Après réalisation de l'empreinte et détermination de son diamètre moyen par l'oculaire gradué du microscope, la dureté HB correspondante est aisément connue via les tables normalisées appropriées.

On présentera en annexe la structure métallographique et la dureté HB d'un échantillon prélevé sur une éprouvette à l'état initial c'est à dire n'ayant pas subi le traitement thermique de normalisation.



Points de mesure de la dureté HB



$$d_m = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

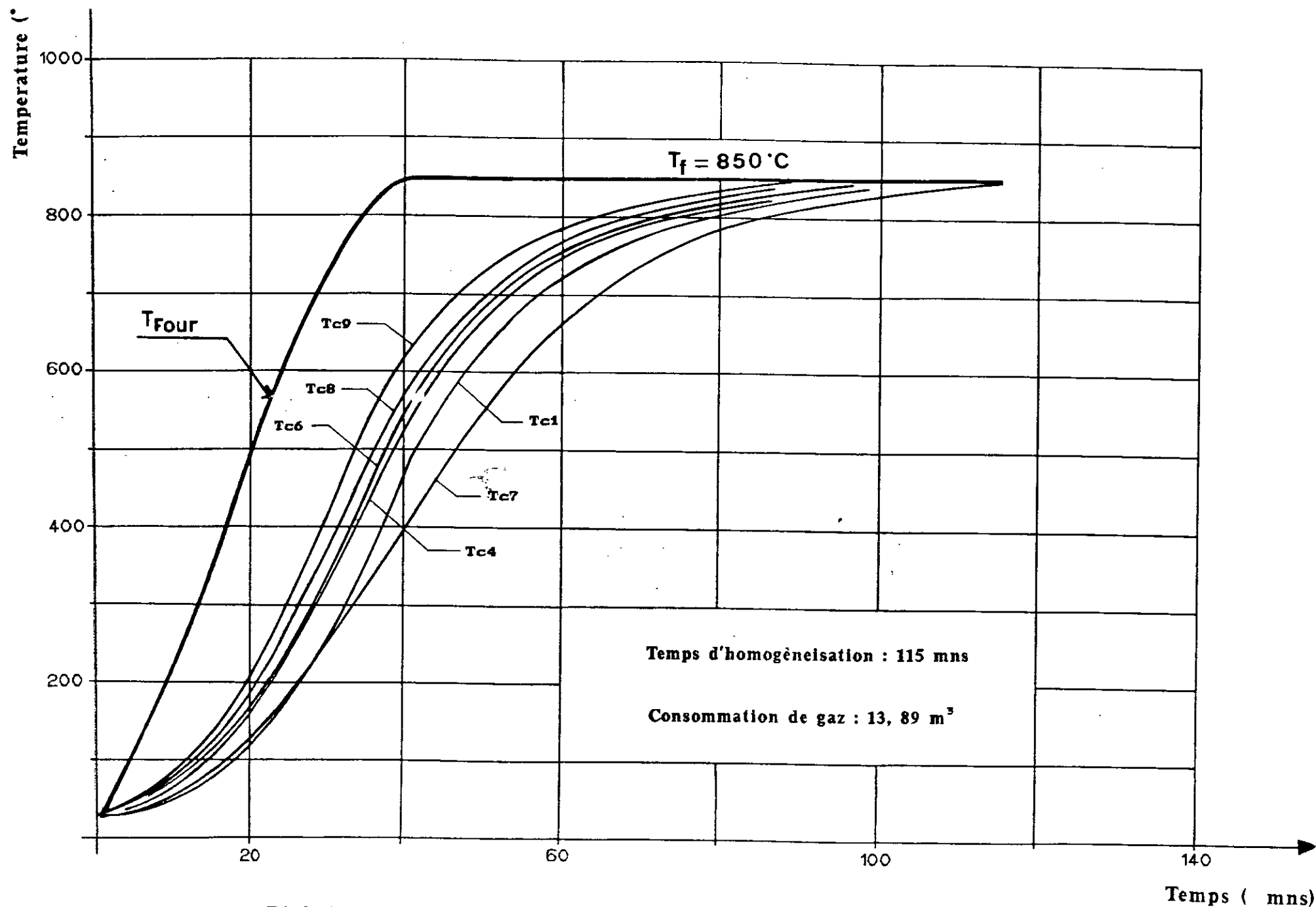
Fig III.3: Points de mesure de la dureté HB et diamètres des empreintes correspondantes

CHAUFFAGE TYPE " A "



Distribution de la température des différents points  
de la pièce lors du chauffage type "A".

Iter N°	Temps [h.mn]	T <sub>four</sub> [°C]	Tc1 [°C]	Tc2 [°C]	Tc3 [°C]	Tc4 [°C]	Tc5 [°C]	Tc6 [°C]	Tc7 [°C]	Tc8 [°C]	Tc9 [°C]
00	00.00	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
01	00.05	120	30	30	32	32	33	33	35	55	56
02	00.10	240	45	50	60	60	61	61	55	80	81
03	00.15	360	80	90	100	100	101	101	90	135	137
04	00.20	480	130	135	160	162	164	166	140	200	205
05	00.25	600	195	200	237	239	242	245	180	295	304
06	00.30	700	270	260	330	334	339	344	240	379	395
07	00.35	780	364	350	420	425	430	435	325	481	500
08	00.40	850	460	425	524	530	536	540	400	580	605
09	00.45	850	560	500	613	622	630	636	482	631	640
10	00.50	850	630	580	670	675	682	700	564	706	723
11	00.55	850	685	645	721	725	730	737	620	732	742
12	01.00	850	730	690	750	753	760	766	675	775	785
13	01.05	850	760	720	779	782	788	794	706	789	795
14	01.10	850	780	750	798	801	806	810	735	810	818
15	01.15	850	800	770	812	815	820	822	760	815	820
16	01.20	850	810	798	820	823	825	828	785	825	832
17	01.25	850	820	814	827	830	833	835	808	830	836
18	01.30	850	828	823	835	838	842	844	820	837	842
19	01.35	850	834	832	839	842	844	846	830	840	845
20	01.40	850	838	840	843	843	845	848	838	845	847
21	01.45	850	843	843	846	847	849	849	844	847	849
22	01.50	850	846	847	848	849	849	849	848	850	850
23	01.55	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850



**FIG III.3 : DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE  
LORS DU CHAUFFAGE " A "**

ETUDE METALLOGRAPHIQUE :

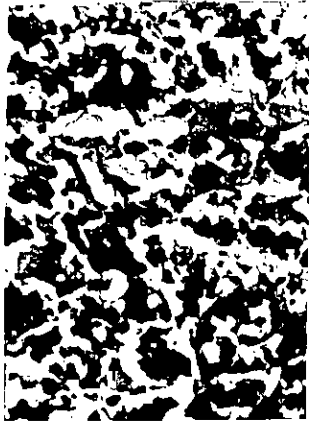


Photo N° 1



Photo N° 2

Fig III.4.A.a: Microstructure des échantillons de la zone centrale

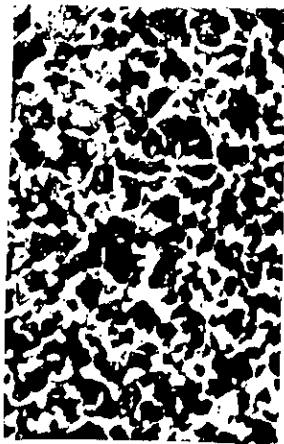


Photo N° 3



Photo N° 4

Figure III.4.A.b: Microstructure des échantillons de la zone A

ETUDE DE DECARBURATION :



Photo N° 1

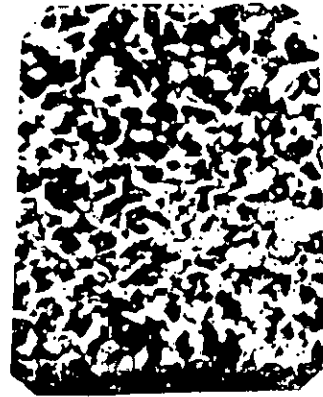


Photo N° 2

Fig III.5.A.a: Décarburation au niveau de la zone centrale

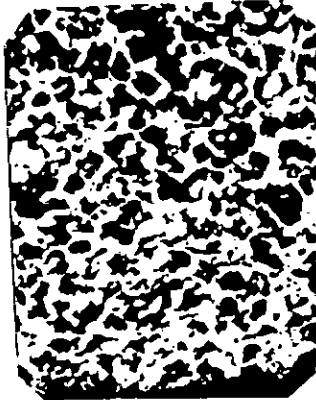


Photo N°

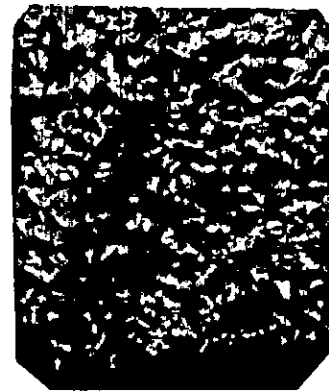


Photo N°

Fig III.5.A.b: Décarburation au niveau de la zone A

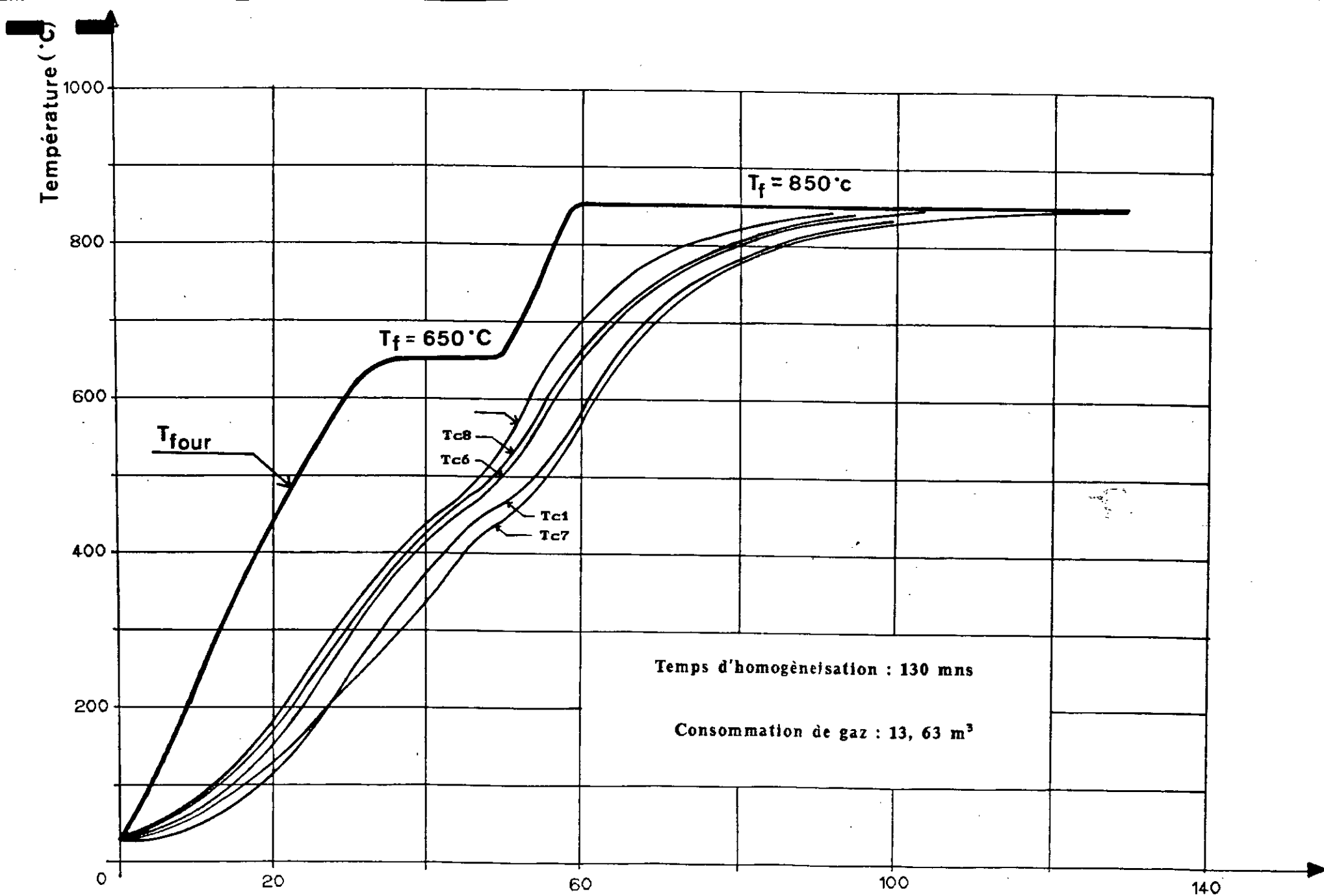
ETUDE DE DURETE :

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,11	2,11	2,110	204
b	2,14	2,13	2,135	199
c	2,14	2,14	2,140	198
d	2,14	2,14	2,140	198
e	2,12	2,13	2,125	201
f	2,14	2,13	2,135	199
g	2,14	2,14	2,140	198
Dureté (HB) moyenne de l'éprouvette				199

Tableau III.6.A.a: Valeurs des duretés HB de la zone centrale

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,13	2,12	2,125	201
b	2,14	2,13	2,135	199
c	2,13	2,13	2,130	200
d	2,13	2,14	2,135	199
e	2,12	2,12	2,120	202
f	2,13	2,13	2,130	200
g	2,14	2,14	2,140	198
Dureté (HB) moyenne de l'éprouvette				199

Tableau III.6.A.b: Valeurs des duretés HB de la zone A



**FIG III.4 : DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE  
LORS DU CHAUFFAGE " B "**

Temps ( ms)

ETUDE METALLOGRAPHIQUE :



Photo N°



Photo N°

Fig III.4.B.a: Microstructure des échantillons de la zone centrale

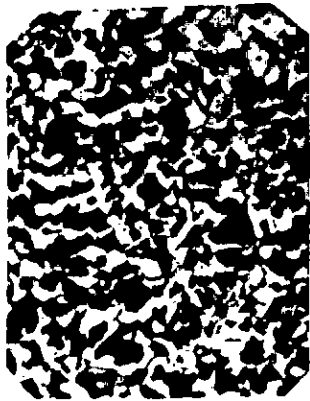


Photo N° 3



Photo N° 4

Fig III.4.B.b: Microstructure des échantillons de la zone A

Distribution de la température des différents points  
de la pièce lors du chauffage type "B".

Iter N°	Temps [h.mn]	T <sub>four</sub> [°C]	Tc1 [°C]	Tc2 [°C]	Tc3 [°C]	Tc4 [°C]	Tc5 [°C]	Tc6 [°C]	Tc7 [°C]	Tc8 [°C]	Tc9 [°C]
00	00.00	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
01	00.05	110	30	30	32	32	32	32	35	51	52
02	00.10	220	44	53	56	57	57	58	55	74	76
03	00.15	330	74	87	93	94	94	96	90	125	127
04	00.20	430	120	128	146	147	148	150	130	178	180
05	00.25	520	175	180	208	210	211	214	180	250	257
06	00.30	590	238	236	280	282	284	287	230	313	322
07	00.35	650	310	288	348	351	353	356	275	391	400
08	00.40	650	372	340	416	421	424	428	325	436	444
09	00.45	650	425	398	455	458	463	467	380	496	504
10	00.50	650	470	449	500	503	506	510	440	507	517
11	00.55	750	513	508	540	541	545	548	495	610	618
12	01.00	850	575	558	623	626	628	633	560	662	671
13	01.05	850	655	652	692	697	700	704	640	712	721
14	01.10	850	712	709	741	744	747	749	705	763	773
15	01.15	850	756	758	778	781	784	786	748	788	800
16	01.20	850	786	786	802	805	808	811	778	810	820
17	01.25	850	810	808	819	822	825	828	800	825	830
18	01.30	850	821	821	832	835	837	839	812	835	838
19	01.35	850	830	829	838	841	843	844	824	838	840
20	01.40	850	835	837	841	843	845	846	834	842	844
21	01.45	850	839	840	845	846	847	847	840	844	846
22	01.50	850	844	845	847	847	848	848	843	845	847
23	01.55	850	846	847	848	848	848	849	845	847	848
24	02.00	850	847	848	848	849	849	849	847	848	850
25	02.05	850	849	849	849	849	849	850	849	850	850
26	02.10	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850



ETUDE DE DECARBURATION :



Photo N° 1

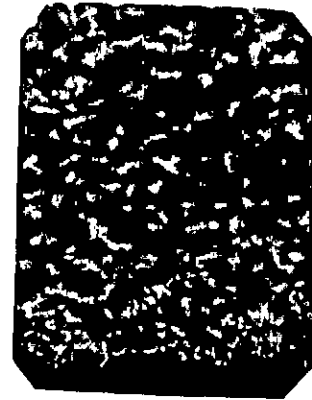


Photo N° 2

Fig III.5.B.a: Décarburation au niveau de la zone centrale



Photo N°

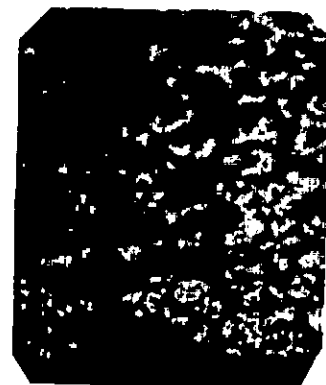


Photo N°

Fig III.5.B.b: Décarburation au niveau de la zone A

**ETUDE DE DURETE :**

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,12	2,11	2,115	203
b	2,13	2,13	2,130	200
c	2,14	2,13	2,135	199
d	2,14	2,14	2,140	198
e	2,14	2,13	2,135	199
f	2,14	2,13	2,135	199
g	2,13	2,13	2,130	200
Dureté (HB) moyenne de l'éprouvette				199

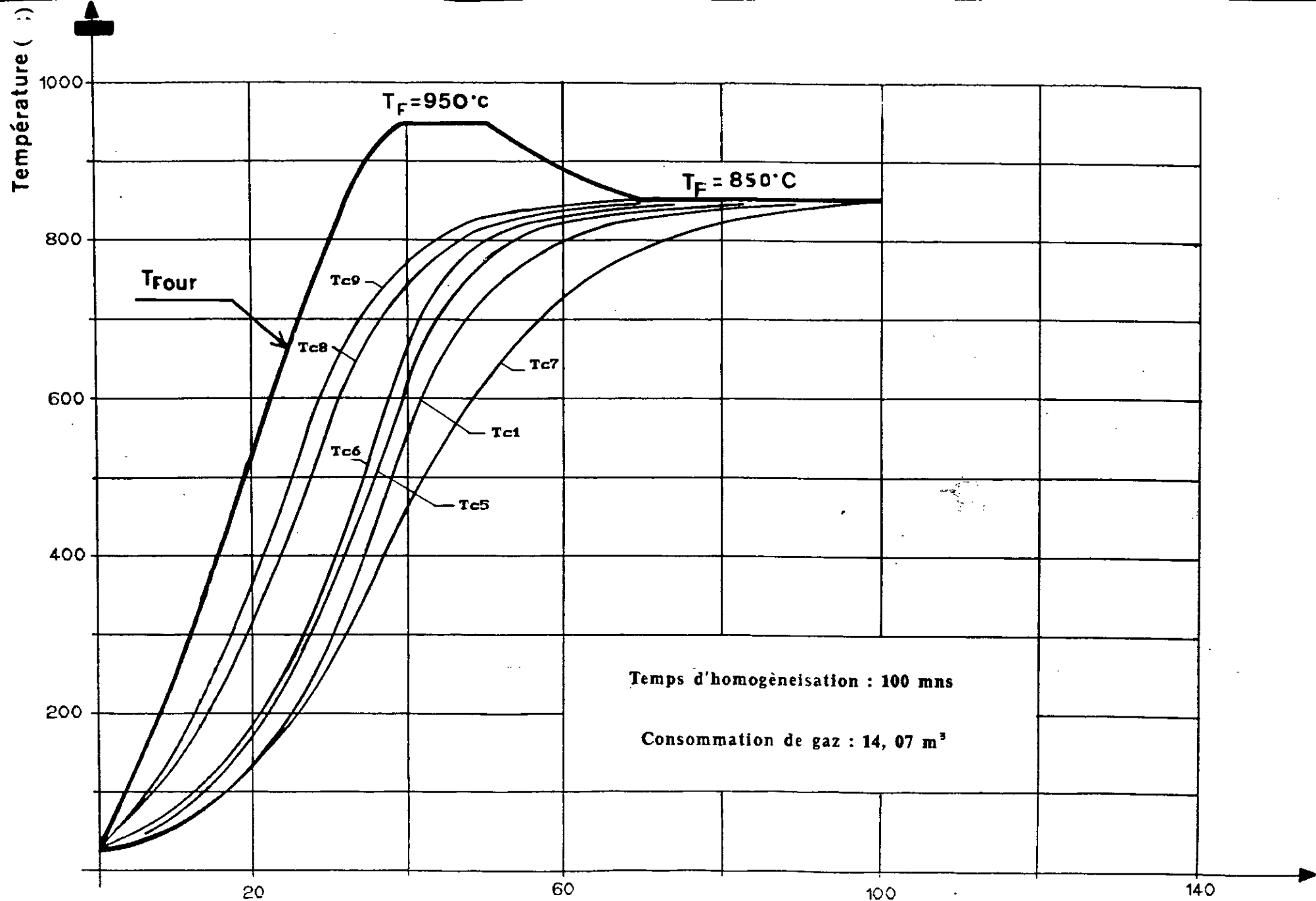
Tableau III.6.B.a: Valeurs des duretés HB de la zone centrale

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,12	2,11	2,115	203
b	2,14	2,13	2,135	199
c	2,14	2,13	2,135	199
d	2,14	2,14	2,140	198
e	2,12	2,13	2,125	201
f	2,14	2,14	2,140	198
g	2,12	2,12	2,120	202
Dureté (HB) moyenne de l'éprouvette				200

Tableau III.6.B.b: Valeurs des duretés HB de la zone A

Distribution de la température des différents points  
de la pièce lors du chauffage type "C".

Iter N°	Temps [h.mn]	Tfour [°C]	Tc1 [°C]	Tc2 [°C]	Tc3 [°C]	Tc4 [°C]	Tc5 [°C]	Tc6 [°C]	Tc7 [°C]	Tc8 [°C]	Tc9 [°C]
00	00.00	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
01	00.05	120	30	30	32	32	33	35	37	54	80
02	00.10	240	46	46	60	61	62	65	57	80	85
03	00.15	370	80	85	103	105	107	110	92	142	148
04	00.20	500	132	138	168	172	175	178	143	208	215
05	00.25	630	202	193	250	257	260	268	185	310	325
06	00.30	760	290	254	352	360	364	375	245	420	444
07	00.35	890	398	357	466	473	479	490	345	562	570
08	00.40	950	526	468	602	610	613	627	450	658	668
09	00.45	950	642	565	700	712	715	720	534	750	762
10	00.50	950	728	645	770	774	777	784	620	808	815
11	00.55	925	786	713	810	812	814	820	680	830	834
12	01.00	900	818	749	830	832	834	837	720	840	842
13	01.05	875	830	780	833	834	836	840	755	842	845
14	01.10	850	834	805	836	836	838	843	791	843	847
15	01.15	850	837	820	840	840	841	846	812	845	848
16	01.20	850	841	828	843	843	843	848	826	847	848
17	01.25	850	844	838	845	845	846	849	836	848	849
18	01.30	850	846	844	847	847	848	849	842	849	850
19	01.35	850	848	848	849	849	849	850	847	850	850
20	01.40	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850



**FIG III.5 : DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE  
 LORS DU CHAUFFAGE " C "**

Temps ( ns)

ETUDE METALLOGRAPHIQUE :



Photo N° 1



Photo N° 2

Fig III.4.C.a: Microstructure des échantillons de la zone centrale



Photo N° 3

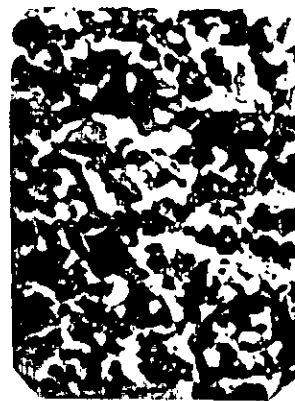


Photo N° 4

Fig III.4.C.b: Microstructure des échantillons de la zone A

**ETUDE DE DURETE :**

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,11	2,11	2,110	200
b	2,14	2,13	2,135	199
c	2,14	2,14	2,140	199
d	2,14	2,14	2,140	202
e	2,12	2,13	2,125	201
f	2,14	2,13	2,135	198
g	2,14	2,14	2,140	201
Dureté (HB) moyenne de l'éprouvette				200

Tableau III.6.C.a: Valeurs des duretés HB de la zone centrale

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,12	2,13	2,125	201
b	2,14	2,13	2,135	199
c	2,12	2,14	2,130	200
d	2,14	2,14	2,140	198
e	2,11	2,11	2,110	204
f	2,14	2,13	2,135	199
g	2,12	2,12	2,120	202
Dureté (HB) moyenne de l'éprouvette				200

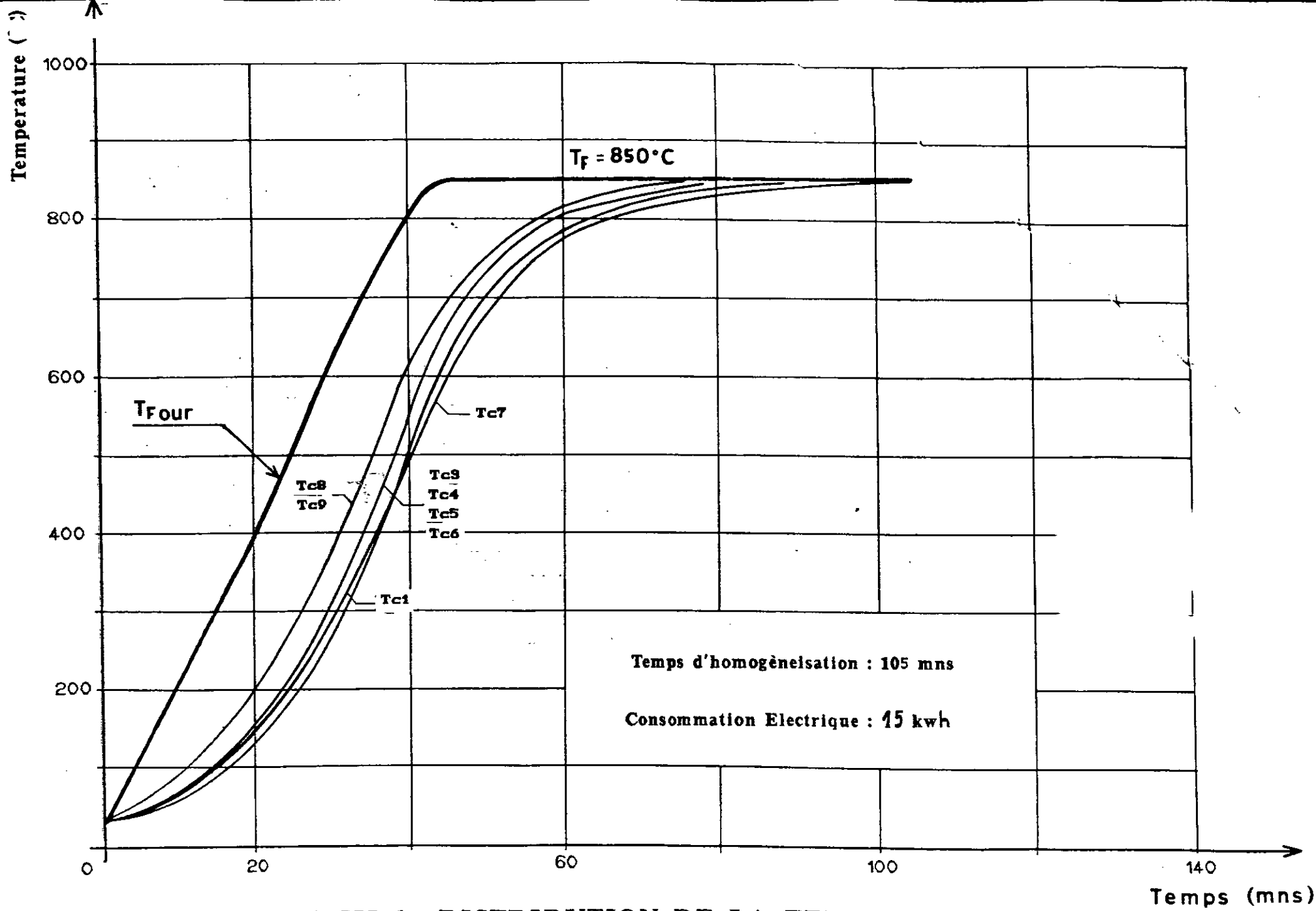
Tableau III.6.C.b: Valeurs des duretés HB de la zone A

CHAUFFAGE TYPE " D "

Distribution de la température des différents points  
de la pièce lors du chauffage type "D".

Iter N°	Temps [h.mn]	T <sub>four</sub> [°C]	Tc1 [°C]	Tc2 [°C]	Tc3 [°C]	Tc4 [°C]	Tc5 [°C]	Tc6 [°C]	Tc7 [°C]	Tc8 [°C]	Tc9 [°C]
00	00.00	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
01	00.05	100	28	29	32	32	32	32	41	54	54
02	00.10	200	47	52	58	58	58	58	60	78	78
03	00.15	300	78	96	98	98	98	98	102	130	130
04	00.20	400	130	145	160	160	160	161	150	191	190
05	00.25	500	192	200	230	230	231	232	215	275	275
06	00.30	600	270	285	319	320	320	321	290	369	370
07	00.35	700	364	375	420	420	421	421	382	487	488
08	00.40	800	470	480	540	539	540	541	485	615	615
09	00.45	850	585	580	660	660	660	661	578	695	695
10	00.50	850	684	671	740	740	740	740	662	751	750
11	00.55	850	746	731	781	782	782	782	722	795	795
12	01.00	850	785	770	810	810	811	811	763	811	812
13	01.05	850	810	805	822	822	821	822	790	830	830
14	01.10	850	825	815	833	834	834	834	805	835	835
15	01.15	850	834	830	839	840	840	841	822	840	840
16	01.20	850	839	835	842	842	843	842	830	843	843
17	01.25	850	843	840	844	844	844	844	836	845	845
18	01.30	850	845	844	846	846	846	847	843	847	847
19	01.35	850	847	847	848	848	848	849	846	849	849
20	01.40	850	849	848	848	849	849	849	848	850	850
21	01.45	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850





**FIG III.6 : DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE  
LORS DU CHAUFFAGE " D "**

ETUDE METALLOGRAPHIQUE :



Photo N° 1



Photo N° 2

Fig III.4.D.a: Microstructure des échantillons de la zone centrale



Photo N° 3



Photo N° 4

Fig III.4.D.b: Microstructure des échantillons de la zone A

ETUDE DE DECARBURATION :



Photo N° 1

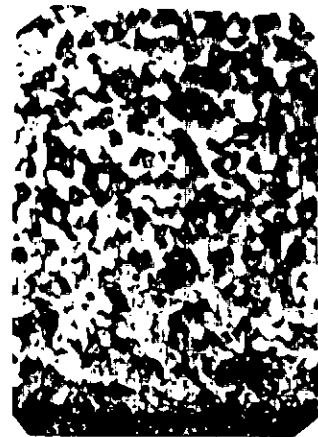


Photo N° 2

Fig III.5.D.a: Décarburation au niveau de la zone centrale



Photo N°



Photo N°

Fig III.5.D.b: Décarburation au niveau de la zone A

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,12	2,12	2,120	202
b	2,14	2,13	2,135	199
c	2,13	2,11	2,120	202
d	2,11	2,13	2,120	202
e	2,12	2,12	2,120	202
f	2,13	2,14	2,135	199
g	2,14	2,13	2,135	199
Dureté (HB) moyenne de l'éprouvette				200

Tableau III.6.D.a: Valeurs des duretés HB de la zone centrale

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,14	2,14	2,140	198
b	2,13	2,14	2,135	199
c	2,11	2,13	2,120	202
d	2,13	2,13	2,130	200
e	2,12	2,13	2,125	201
f	2,14	2,14	2,140	198
g	2,14	2,13	2,135	199
Dureté (HB) moyenne de l'éprouvette				199

Tableau III.6.D.b: Valeurs des duretés HB de la zone A

## ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX :

Une première analyse des résultats obtenus montre d'abord que dans le cas d'un chauffage normal type "A", le temps d'homogénéisation permettant l'atteinte d'une température homogène de 850 °C dans toute l'épaisseur de la pièce est de 115 minutes et que la quantité de gaz consommé est de 13,89 m<sup>3</sup>.

Pour obtenir une température homogène de 850 °C dans le cas du chauffage par paliers du type "B", il s'écoule 130 mns et la consommation de gaz est de 13,63 m<sup>3</sup>.

On assiste dans ce cas à une différence (un retard) de 15 minutes environ dûe certainement au passage à 650 °C par le palier de 15 mns. En revanche, la consommation de gaz est moindre, et les températures des différents points sont rapprochées les unes des autres. Les contraintes thermiques sont donc moins sévères.

Par cōtre, le chauffage type "C" présentant une surchauffe à 950 °C pendant 10 mns est le plus économique: on enregistre un temps d'homogénéisation de 100 minutes pour une consommation de gaz de 14,07 m<sup>3</sup>.

L'application de ce type de chauffage offre la possibilité de réduire d'une quinzaine de minutes le temps requis pour la réalisation dans les conditions normales d'un traitement thermique de 115 mns tel que le chauffage type "A".

Ces deux avantages réunis font du procédé de chauffage type "C" une technique performante à recommander: elle économise en temps et en énergie.

Les résultats fournis par le chauffage dans un four électrique à convection forcée qui est un four performant montrent que le temps d'homogénéisation est de 100 minutes, les températures des différents points sont très homogènes, il y en a même qui sont égales, en l'occurrence celles des points Tc3, Tc4, Tc5 et Tc6 ainsi que celles des points Tc8 et Tc9; Néanmoins, l'énergie électrique consommée revient plus chère.

Une étude comparative technico-économique entre les quatre types de chauffage montre que le type "B" conduit à une plus faible dispersion des températures et une montée moins rapide de celles-ci, compensée par une plus faible consommation d'énergie.

Le traitement thermique réalisé sous les conditions d'une surchauffe à 950 °C est à retenir. Les performances qu'il offre sont comparables à celles données par un four électrique à convection forcée, en plus du prix de revient plus bas.

A notre avis, dans tous les cas de figure, l'impact sur la durée de vie des différents constituants du four est pratiquement identique vu que ces fours sont assez performants, et sont conçus pour des températures plus élevées.

\* \* \* \* \*

Le deuxième volet des analyses montre que le traitement thermique de Normalisation de l'acier XC 42, en fonction de chaque type de chauffage, a permis d'obtenir les caractéristiques mécaniques attendues.

L'étude métallographique des échantillons prélevés au sein des différentes éprouvettes, révèle une structure ferrito-perlitique fine et homogène quasi-identique dans les quatre cas de figures et dans les différentes zones de l'éprouvette.

L'analyse du phénomène de décarburation via les photographies de structure au niveau de la périphérie de l'éprouvette et en nous servant de la méthode de calcul du taux de décarburation citée préalablement (cf. eq. III.1), montre que ce dernier est très faible pour tous les types de chauffage.

Ceci s'explique par le fait que la durée du traitement n'était pas assez longue (2 heures environ), ce qui ne permet pas une forte décarburation. Ce phénomène pourrait être plus important si la pièce est maintenue beaucoup plus longtemps dans le four, en particulier dans le four à gaz où il y a un apport continu de gaz et d'air (oxygène).

Dans les cas de figures (chauffages "A", "B", "C" et "D"), on remarque que les pourcentages de perlite et de ferrite sont d'environ 50 % chacun.

A partir de la relation (III.1), on tire le % de carbone restant au niveau de la zone périphérique comme suit:

$$\frac{50 \cdot 0,8}{100} + \frac{50 \cdot 0,02}{100} = 0,41 \%$$

ce qui donne un taux de décarburation d'environ 9 % .

La mesure des duretés donne des résultats très proches les des autres relativement à chaque type de chauffage et dont la valeur moyenne est de 200 HB.

De manière générale, ces résultats représentant l'amélioration des propriétés mécaniques sus-citées sont très satisfaisants; il apparait de même en filigrane de ces résultats que les autres caractéristiques mécaniques, à titre d'exemple la résistance à la rupture par traction et la résilience ont nécessairement été améliorées [8,10,16].

## CONCLUSIONS :

L'investigation des propriétés mécaniques attendues par le traitement thermique de Normalisation en fonction de chaque type de chauffage, révèle une grande analogie entre les différents résultats obtenus aussi bien par les essais de dureté et de l'étude métallographique que par l'étude de décarburation.

L'examen des courbes expérimentales montre que la distribution de température dans les différents points de la pièce est directement liée au mode de chauffage utilisé. L'étude expérimentale que nous avons menée fait apparaître que dans le cas d'un chauffage où l'on fait minutieusement intervenir une surchauffe, on assiste à une évolution plus rapide de la température de la pièce. Le temps d'homogénéisation et par conséquent le temps d'exécution du traitement se trouve réduit d'environ une quinzaine de minutes. Il est donc clair que pour une année d'environ 6000 heures de service, on pourrait effectuer plusieurs centaines de traitements thermiques supplémentaires.

Un autre avantage qui ressort en filigrane de ces travaux, est que l'optimum économique qui correspond à un optimum temporel peut également correspondre à un optimum énergétique.

Il convient également de noter que les résultats obtenus par cette tentative sont comparables avec ceux d'un four plus performant, en particulier un four électrique à convection forcée.





#### IV-1 INTRODUCTION :

Le principe fondamental de cette modélisation mathématique est de définir un ensemble d'équations mathématiques ayant pour objectif la simulation du phénomène expérimental [51,53]. Son rôle est de déterminer, en amont, la distribution de la température et permet son suivi au cours de chaque mode de chauffage. En aval, le temps d'homogénéisation et par conséquent le temps de maintien, peuvent être connus avec une assez grande précision, ce qui représente l'un des plus importants facteurs d'économie de l'énergie.

Le modèle mathématique ainsi établi est complété par les conditions initiales et aux limites relatives à chaque procédé [51]. Celles-ci sont évidemment déterminées expérimentalement dans le souci d'assurer une représentation irréfutable du phénomène réel.

L'avantage essentiel est que le modèle élaboré puisse être utilisé dans un grand domaine de variation de variables, surtout lorsqu'il n'y a pas de changement majeur aussi bien dans les mécanismes fondamentaux de transfert de chaleur entre le corps de chauffe et le matériau à chauffer que dans le matériau lui-même.

La vérification du modèle et la confrontation des résultats, donnés par le logiciel informatique qui en découle, à la réalité est nécessaire afin que celui-ci puisse être utilisé avec confiance et promptitude pour prévoir ou étudier le comportement d'autres procédés similaires.

Un outil mathématique puissant [21,55,54,6] permettant d'approcher avec un grand succès et un degré de précision préalablement choisi les processus de transfert de chaleur [6,32] a été utilisé: **Les différences finies**. Son principe est le

remplacement de l'équation différentielle à distribution de température continue par des équations aux différences finies qui doivent satisfaire de manière discrète la température les différents points du solide [21,2,28].

La littérature relative à cette approche numérique [50,51,36,39,22,18] a montré que son utilisation via la méthode de PEACEMAN et RACHFORD ( A.D.I :Alternating Direction Implicit ) serait la plus performante, en effet elle assure, sans qu'ils fassent l'objet de vérification, les critères de stabilité, de convergence et de précision [6]; elle économise même en opérations d'ordinateurs [54].

La méthode de THOMAS (T.D.M.A :TriDiagonal Matrix Algorithm) a été judicieusement choisie pour résoudre le système d'équations établi, eu égard à sa facilité de mise en oeuvre, à sa simplicité et à sa précision. Aussi, elle s'adapte parfaitement à la méthode A.D.I. [6,55,29].

Ce travail est conclu par l'élaboration d'un logiciel, précédé d'un organigramme général, dont les résultats fournis feront l'objet d'une confrontation avec ceux donnés par les essais expérimentaux.

#### **IV-2 Position du problème :**

Le déroulement d'un traitement thermique d'une pièce métallique à l'intérieur d'un four est un processus difficile à cerner et à maîtriser. Son approche par un modèle mathématique est sans nul doute complexe: Ceci est dûe en partie aux différents mécanismes de transmission de chaleur mis en jeu, en particulier le rayonnement qui obéit à une loi non linéaire; d'autre part, une panoplie de paramètres doivent être connus, en l'occurrence, le coefficient d'écoulement par convection, le

facteur d'échange par rayonnement, la cadence de chauffage du four..., dont l'estimation est très souvent liée à une série d'autres paramètres, qui eux même nécessitent une analyse individuelle spécifique.

En régime transitoire, les différentes zones de l'éprouvette "voient" leurs températures évoluer d'une certaine manière (en fonction de chaque mode "A", "B", "C", "D" de chauffage), pour se stabiliser finalement à la température de 850 °C prévue par le traitement thermique de Normalisation.

Le régime stationnaire est atteint au bout d'un certain temps, appelé " Temps d'homogénéisation ": Celui-ci dépend de la taille de la pièce et du mode de chauffage et indique que l'équilibre thermique dans la phase austénitique est atteint.

\* N.B: A partir de ce moment, et en fonction de la nature du traitement thermique envisagé, un temps de maintien supplémentaire de la pièce à cette température pourrait avoir lieu avant de passer à l'étape de refroidissement.

Ces procédés de chauffage, d'homogénéisation et de refroidissement sont continus dans l'espace et dans le temps. Ils sont rationnellement régis par des lois continues appropriées qu'il faudrait discrétiser.

Pour simuler un tel processus, la modélisation mathématique doit être entreprise en liaison étroite avec le travail expérimental en profondeur [53,51].

Il convient dans ce qui suit d'énumérer les principales étapes à suivre dans le développement du modèle en question: [53,58].

- 1)-: Une bonne compréhension du procédé.
- 2)-: Une analyse préliminaire des équations gouvernant les différents mécanismes de transfert de chaleur dans le four et dans l'éprouvette pour chaque mode de chauffage.
- 3)-: Une division (fictive) adéquate (discrétisation ou maillage) du domaine d'étude (éprouvette cylindrique) en volumes appropriés.
- 4)-: La discrétisation de l'équation de conduction en régime transitoire; son application pour chaque zone de l'éprouvette maniant une méthode spécifique.
- 5)-: L'établissement d'un système d'équations en utilisant les paramètres et les variables du système expérimental ainsi que les conditions initiales et aux limites.
- 6)-: La résolution du système d'équations par une méthode numérique judicieuse.
- 7)-: L'évaluation de la validité du modèle et la confrontation des résultats en ayant recours à l'ordinateur pour l'exécution du logiciel informatique élaboré.

Il est bon de rappeler succinctement les principes généraux de fonctionnement d'un four de traitement thermique, voire de présenter les mécanismes de transfert de chaleur mis en jeu lors du chauffage, avant d'aborder les différentes étapes de la modélisation mathématique du processus de normalisation de l'éprouvette cylindrique horizontale en acier XC42 en fonction des quatre différents modes de chauffage.

#### IV-3 Principes de fonctionnement d'un four de traitement thermique :

Un four est un équipement de chauffage. Schématiquement, celui-ci est constitué d'une enceinte chauffée soit par des résistances soit par un brûleur éjectant un combustible (gaz...). [3,15]. Cette enceinte, souvent appelée chambre de chauffe, doit

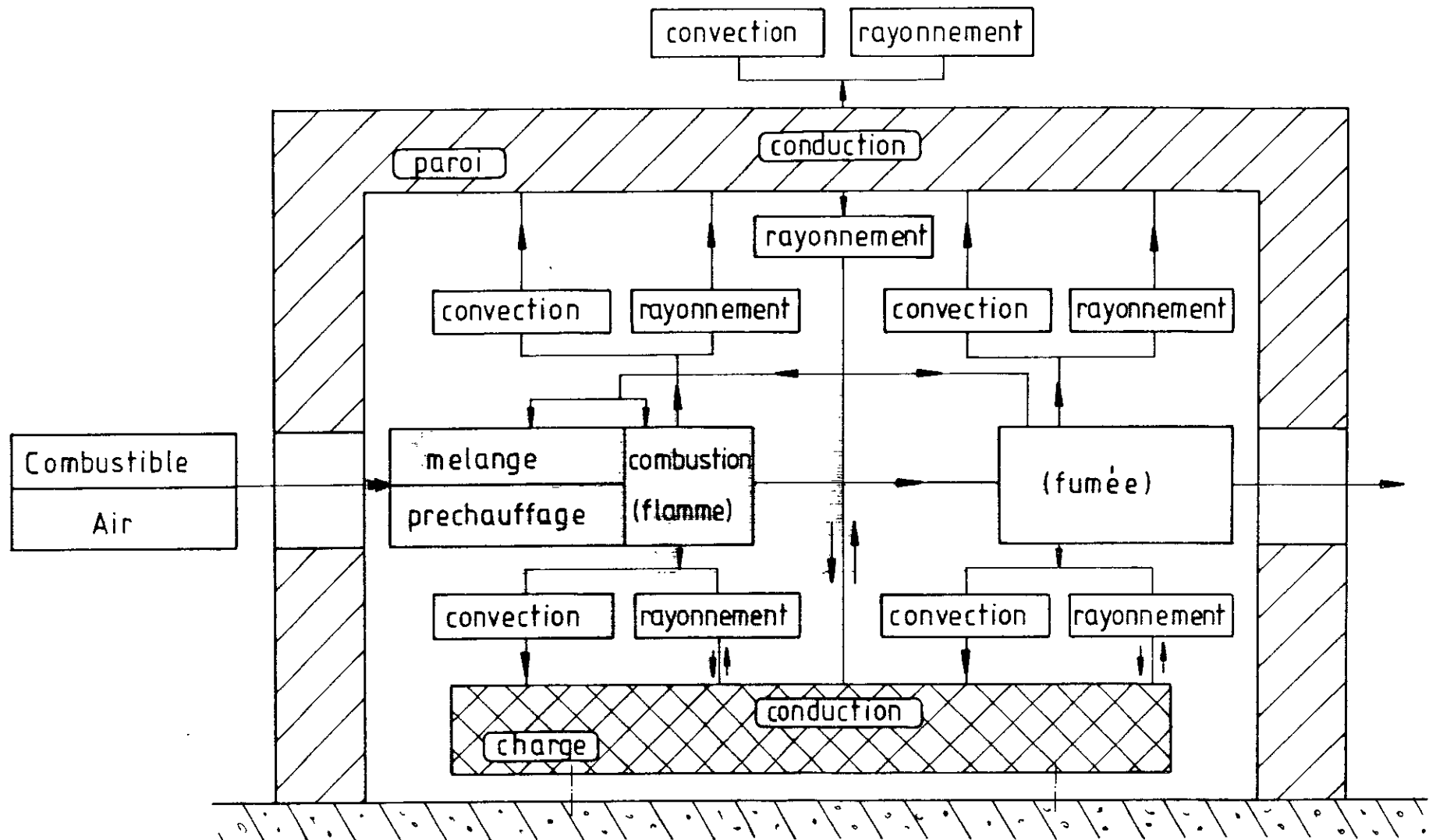


Figure IV-1 : PROCESSUS DE TRANSFERT DE CHALEUR DANS UN FOUR INDUSTRIEL À GAZ

être très bien calorifugée afin de réduire le plus possible les déperditions thermiques. La charge à chauffer est placée dans cette enceinte. L'asservissement est assuré par un régulateur.

Très utilisé en métallurgie, le four de traitement thermique permet de porter la température de la charge de l'ambiante à une température prédéterminée par le traitement, de l'y maintenir pendant un temps donné en vue de modifier ses propriétés après le refroidissement suivant une loi prédéfinie.

Le corps de chauffe (résistances ou brûleur) produit une énergie calorifique qui sera transmise à la substance à chauffer et aux parois du four. En fait, seule une partie de cette chaleur est absorbée par la charge; l'autre partie sert à chauffer l'enceinte du four et constitue les pertes thermiques (cf. fig IV-1).

Cet équipement utilise les lois usuelles de la thermique, en particulier celles déterminant la transmission de la chaleur par convection (*naturelle ou forcée*) et rayonnement entre le corps de chauffe et la charge (et les parois éventuellement) ainsi que la conduction qui constitue l'unique mode de propagation de la chaleur à l'intérieur de la charge (cf. fig IV.2).

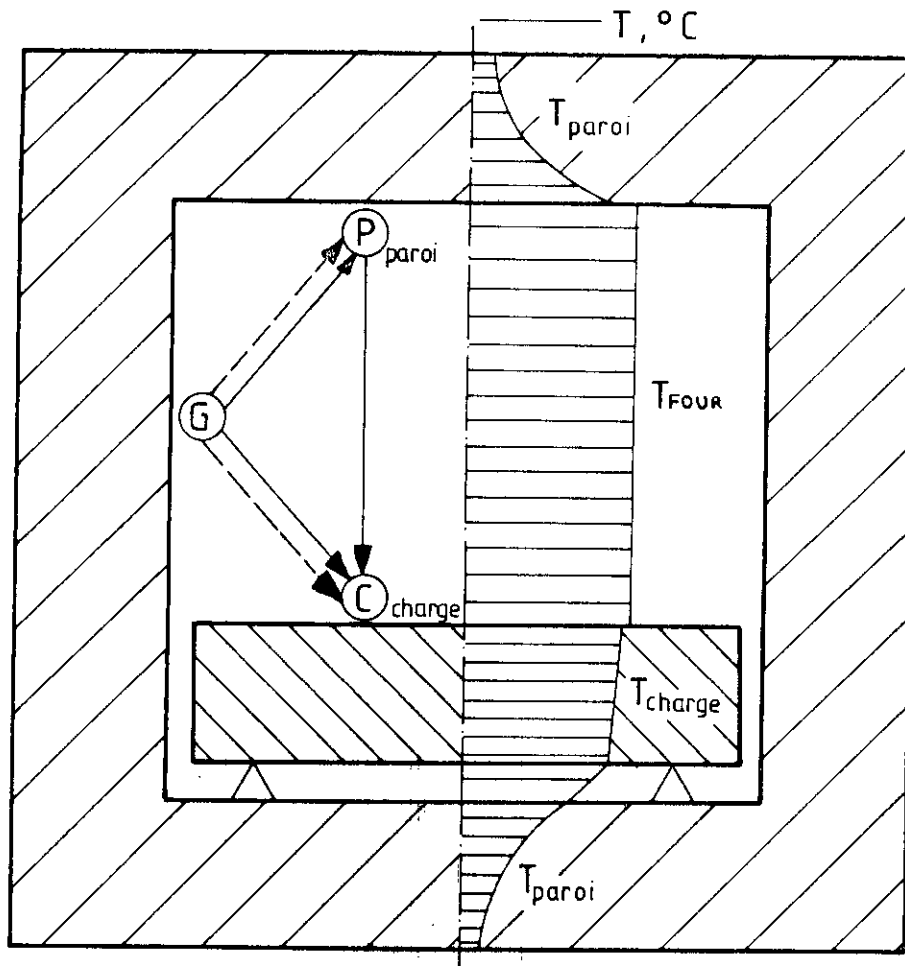
Les lois régissant chacun de ses mécanismes de transfert de chaleur sont rappelées ci- dessous:

**\*\* LA CONVECTION:**

L'expression suivante exprime le flux de chaleur en fonction de la température:

$$q = h.S.( T_f - T_p )$$

(IV.1)



- \\\\\\\\\\ conduction thermique
- rayonnement thermique
- convection thermique

Figure **IV-2**: MODELE DE TRANSFERT DE CHALEUR  
DANS UN FOUR INDUSTRIEL



où:  $q$  : Chaleur transmise [kcal]  
 $S$  : Surface chauffée [ $m^2$ ]  
 $T_F$  : Température du four [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_p$  : Température de la pièce [ $^{\circ}C$ ]

**\*\* LA CONDUCTION:**

Celle-ci est représentée par la loi de Fourier, telle que:

$$dq = - k.S. \frac{\partial T}{\partial x} \quad (IV.2)$$

où:  $dq$  : Flux de chaleur [kcal/m]  
 $k$  : Conductivité thermique du matériau [kcal/ $m^2.h.^{\circ}C$ ]  
 $\frac{\partial T}{\partial x}$  : Gradient de température [ $^{\circ}C/m$ ]

**\*\* LE RAYONNEMENT:**

La loi de STEFFAN-BOLTZMANN exprime ce mécanisme par une équation non linéaire comme-suit:

$$q = S.\epsilon.\sigma.F.(T_F^4 - T_p^4) \quad (IV.3)$$

où:  $\epsilon$  : Emmissivité globale de la source et du matériau  
 $\sigma$  : Coefficient de Steffan-Boltzman  
 $F$  : Facteur d'échange de la chaleur

#### IV-4 Equation différentielle de conduction :

De la loi de Fourier citée préalablement, ressort l'équation différentielle de conduction de la chaleur dans un solide en régime transitoire, par rapport à une seule direction [2,17,20,59,61] comme :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{IV.4})$$

avec: x: Direction du chauffage [m]

$\frac{\partial T}{\partial x}$ : Gradient de température dans la direction x [ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ]

$\dot{q}$ : Chaleur due aux sources internes du matériau [ $\text{kcal}/\text{m}^3\text{h}$ ]

$C_p$ : Chaleur spécifique massique du matériau [ $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ]

Dans le cas d'un système tridimensionnel, l'équation définissant la répartition des températures en chaque point du corps, s'obtient en combinant l'équation (IV.4) dans les directions x, y, et z pour obtenir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{IV.5})$$

Une écriture équivalente est donnée par:

$$\boxed{\nabla^2 T + \dot{q} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}} \quad (\text{IV.6})$$

où,  $\nabla$  représente le laplacien.

A partir de (IV.5), et en faisant le changement de variables suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = r \cdot \cos\theta. \\ y = r \cdot \sin\theta. \\ z = z. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} r, \theta, \text{ et } z \\ \text{représentent les coordonnées} \\ \text{cylindriques.} \end{array}$$

On aboutit à l'équation différentielle de conduction en coordonnées cylindriques sans sources internes:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} ( \frac{k}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} ) + \frac{\partial}{\partial z} (k \cdot \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (\text{IV.7}).$$

où,  $\frac{\partial T}{\partial r}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial \theta}$  et  $\frac{\partial T}{\partial z}$  représentent respectivement la variation du gradient de température dans les directions r,  $\theta$ , et z.

#### IV-4-1 Conductivité Thermique k :

Le coefficient de conductivité thermique est généralement exprimé en W/m.°c ou en kcal/mh.°c.

A l'instar des autres corps, les matériaux métalliques ont une conductivité thermique qui dépend de la température. (cf. fig. IV.3).

Pour l'acier XC42, la conductivité thermique k est approchée par une fonction linéaire (cf. fig. IV.3) de la forme :

$$k = k_0 - 2,45 \cdot 10^{-2} T \quad (\text{IV.8})$$

$k_0$ : étant la conductivité thermique à la température ambiante;

$k_0 = 45 \text{ Kcal/m.}^\circ\text{c.}$

T: étant la température du point considéré de la pièce.

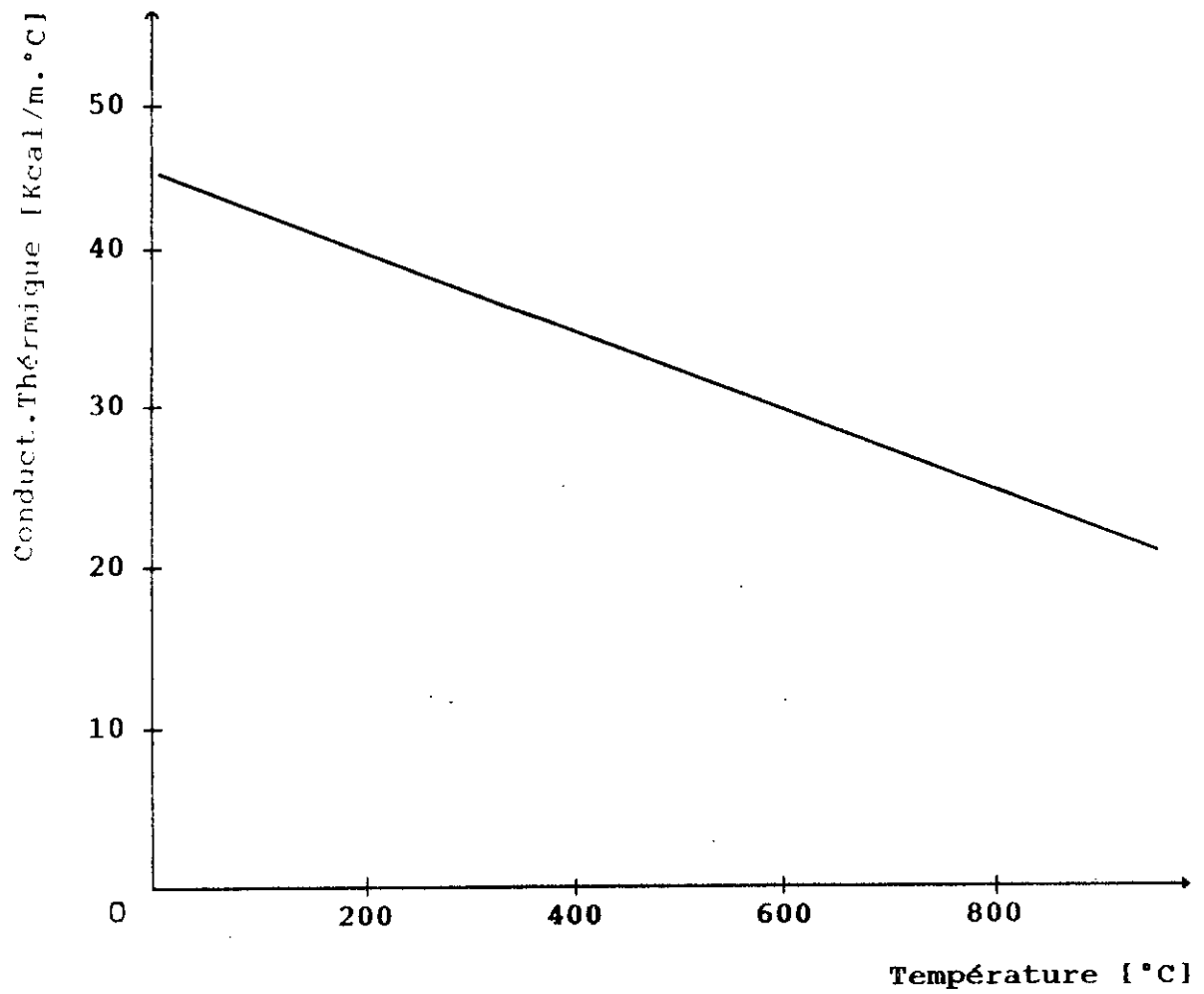


Fig IV.3: Conductivité Thermique de l'acier XC 42.

#### IV-4-2 Chaleur spécifique $C_p$ :

Cette grandeur qui exprime la quantité de chaleur à fournir au corps afin d'élever sa température de  $1^\circ\text{C}$  est également liée à la température .

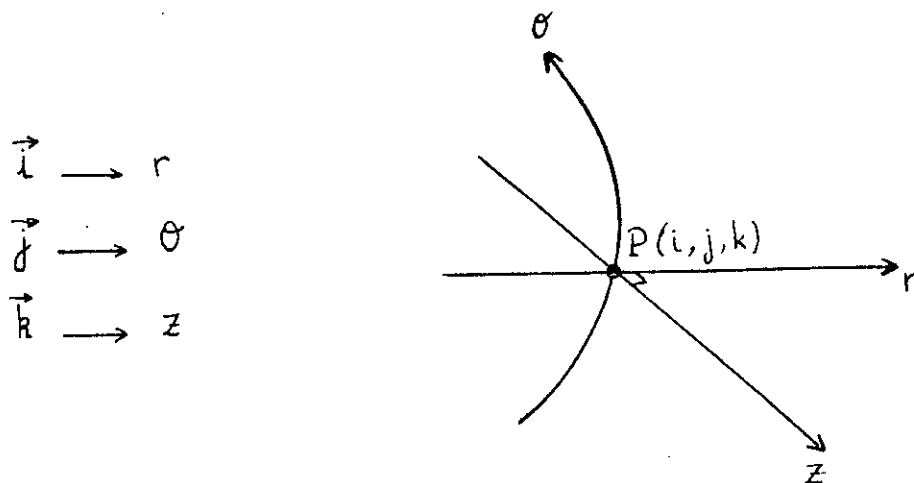
Dans le cas des aciers, elle est généralement donnée par des tableaux. Néanmoins, pour l'acier XC42, on représenté sa chaleur spécifique massique par la fonction approximative suivante:

$$C_p = C_{p0} + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 \quad (\text{IV.9})$$

$C_{p0}$  : étant la chaleur spécifique à l'ambiante; =  $0,11 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$ .  
 $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes.  $C_1 = 4 \cdot 10^{-5}$  ;  $C_2 = 10^{-10}$   
(cf. fig. IV.4).

#### IV-5 Discrétisation de l'équation différentielle :

Considérons un point P de coordonnées  $i, j, k$  par rapport aux directions  $r, \theta, \text{ et } z$ , comme indiqué par la représentation suivante:



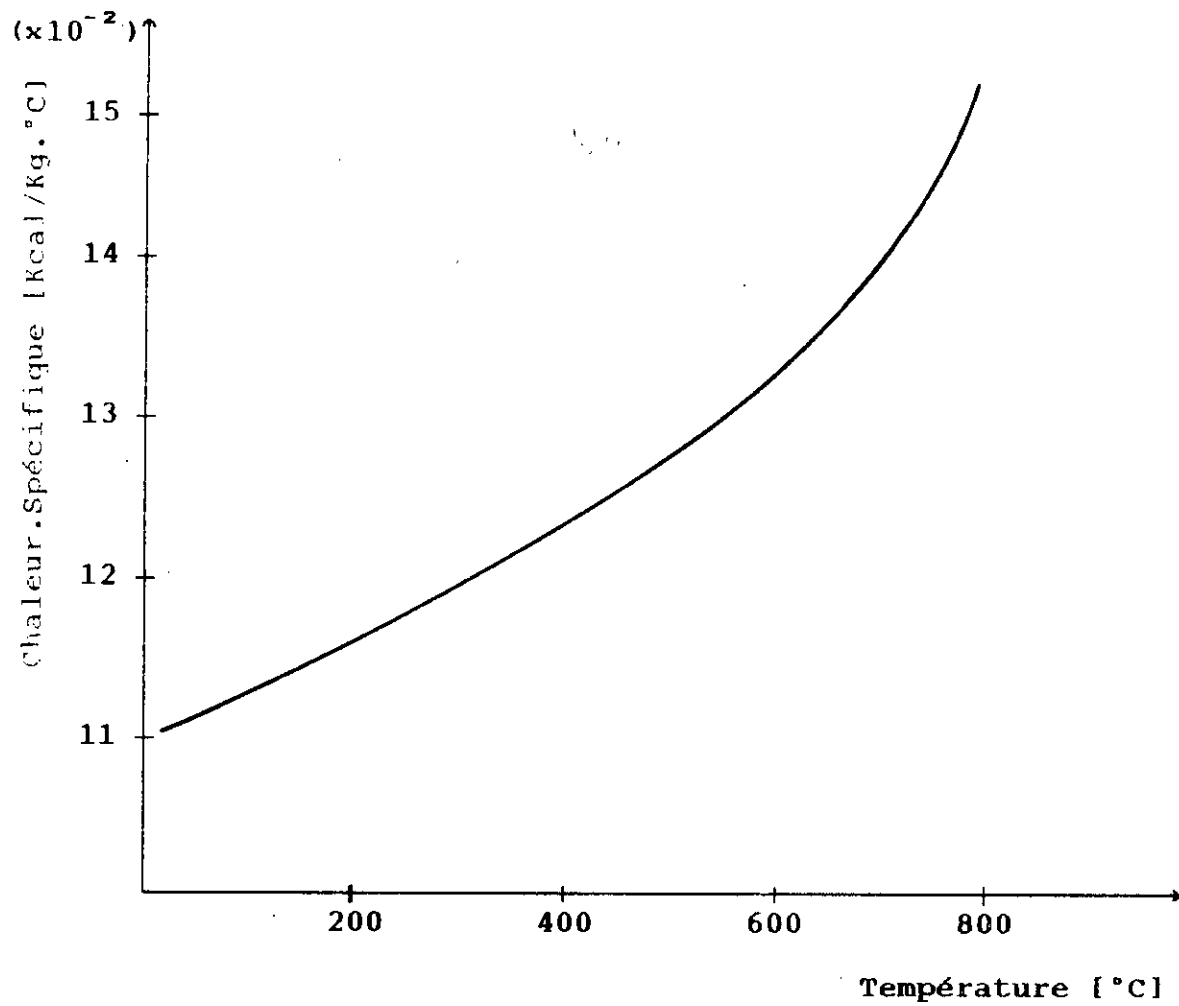


Fig IV.4: Chaleur Spécifique massique de l'acier XC 42.

Le concept général de la méthode numérique des différences finies appliquée en conduction thermique en régime transitoire est de diviser la matière (éprouvette) en régions aux centres desquelles on place un noeud [54,52,6,1]; effectuer la transformation de l'équation différentielle exacte en équations aux différences finies où interviennent la température du noeud considéré, celles des voisins et les propriétés thermiques de la matière, et où figurera un terme capacitif représentant l'augmentation de l'énergie interne en fonction du temps [51].

Dans le cas tridimensionnel, en coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$ , l'éprouvette est divisée en volumes élémentaires appelés "volumes de contrôle" ayant pour dimensions  $\Delta r$ ,  $\Delta \theta$ , et  $\Delta z$ . [6,51,33].

Le noeud se trouvant au centre de chacun d'eux est entouré de six (06) voisins (*cf. fig IV.5*) :

\* Deux (02) suivant la direction  $r$ , ce sont les noeuds N et S, relativement à Nord et Sud.

\* Deux (02) suivant la direction  $\theta$ , ce sont les noeuds H et B, relativement à Haut et Bas.

\* Deux (02) suivant la direction  $z$ , ce sont les noeuds E et O, relativement à Est et Ouest.

Les parois  $n, s, h, b, e$  et  $o$  représentent les faces de chaque volume de contrôle selon les directions sus-citées.

Le schéma suivant représente un noeud P tel que décrit si-dessus.

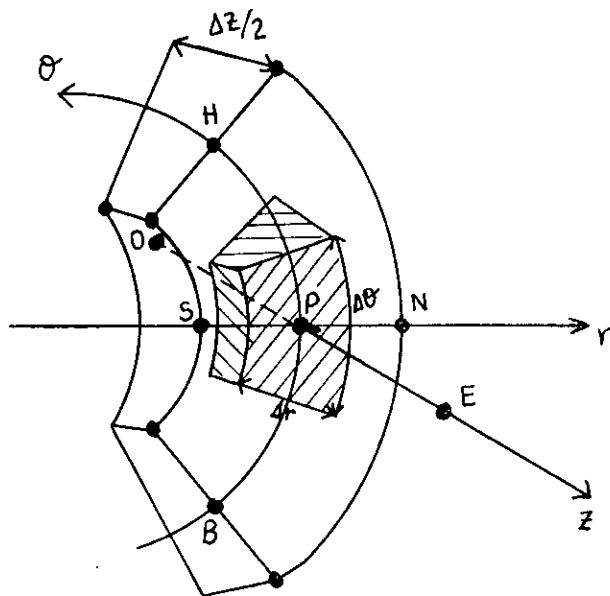


Figure IV.5: Schéma d'un noeud P(i,j,k) situé dans son volume de contrôle et entouré de ses 6 voisins.

A partir de l'équation générale (IV.6), et en transposant le facteur r dans le membre de gauche, on obtient l'eq (4.10):

$$\rho \cdot C_p \cdot r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( k \cdot r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{k}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Sachant que la température est, en plus du facteur temps, fonction de r,  $\theta$ , et z, l'équation (IV.10) s'écrit:

$$\begin{aligned} \iiint \rho \cdot C_p \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dt \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz &= \iiint \frac{\partial}{\partial r} \left( k \cdot r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr \cdot dt \cdot d\theta \cdot dz \\ &+ \iiint \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{k}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) d\theta \cdot dt \cdot dr \cdot dz \\ &+ \iiint r \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \cdot dt \cdot d\theta \cdot \end{aligned}$$

(IV.11).



Pendant un intervalle de temps  $\Delta t$  pris entre un instant  $t_0$  et un instant considéré  $t$ , le point P ( $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ ) "voit" sa température varier de  $T_P^{t_0}$  à  $T_P^t$ ; ce qui permet d'écrire [6].

$$\begin{aligned} \iiint \rho \cdot C_P \cdot r \cdot (T_P^t - T_P^{t_0}) \, dr \cdot d\theta \cdot dz &= \iiint (k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r})_n^t \, dt \cdot d\theta \cdot dz \\ &+ \iiint (\frac{k}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta})_b^h \, dt \cdot dr \cdot dz \\ &+ \iiint r \cdot (k \cdot \frac{\partial T}{\partial z})_o^c \, dt \cdot dr \cdot d\theta \end{aligned}$$

(IV.12)

En intégrant le terme  $r \cdot dr$  du membre de gauche et sachant que le point P est entouré des 6 voisins dénommés ci-dessus, on aboutit à:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho \cdot C_P (r_N^2 - r_S^2) \cdot (T_P^t - T_P^{t_0}) \cdot \Delta\theta \cdot \Delta z &= \\ &= \iiint \left\{ k_N \cdot r_N \cdot (\frac{\partial T}{\partial r})_n - k_S \cdot r_S \cdot (\frac{\partial T}{\partial r})_o \right\} dt \cdot d\theta \cdot dz \\ &+ \iiint \left\{ \frac{k_H}{r_H} \cdot (\frac{\partial T}{\partial \theta})_h - \frac{k_B}{r_B} \cdot (\frac{\partial T}{\partial \theta})_b \right\} dt \cdot dr \cdot dz \\ &+ \iiint r \cdot \left\{ k_E \cdot (\frac{\partial T}{\partial z})_e - k_D \cdot (\frac{\partial T}{\partial z})_d \right\} dt \cdot dr \cdot d\theta. \end{aligned}$$

(IV.13)

Ceci étant, l'écriture de l'équation différentielle discrétisée de l'évolution de la température d'un point P (i,j,k) appartenant à un volume de contrôle de dimensions  $\Delta r$ ,  $\Delta \theta$ ,  $\Delta z$  de l'éprouvette cylindrique pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$  prendra donc la forme suivante [6,36]:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \rho \cdot C_P (r_N^2 - r_S^2) \cdot (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) \cdot \Delta \theta \cdot \Delta z = \\
 & = \int_t^{t+\Delta t} \left\{ k_N \cdot r_N \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_n - k_S \cdot r_S \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_s \right\} \Delta \theta \cdot \Delta z \cdot dt \\
 & + \int_t^{t+\Delta t} \left\{ \frac{k_H}{r_H} \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_h - \frac{k_B}{r_B} \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_b \right\} \Delta r \cdot \Delta z \cdot dt \\
 & + \int_t^{t+\Delta t} r \cdot \left\{ \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_o - k_o \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_o \right\} \Delta r \cdot \Delta \theta \cdot dt
 \end{aligned}$$

(IV.14)

#### IV-6 Discrétisation du domaine d'étude :

Pour des raisons de symétrie, de disposition horizontale de l'éprouvette à l'intérieur du four, et à la manière d'être chauffée (cf. fig IV.6); notre étude intéresse uniquement une partie en effet les résultats de la partie symétrique seront évidemment analogues.

Il convient également de noter que la température des fours utilisés est homogène suivant la direction z de l'éprouvette, ce qui réduit à deux dimensions (r et  $\theta$ ) l'étude du profil de température. En conséquence, dans la direction z, les parois sont adiabatiques et on note que:

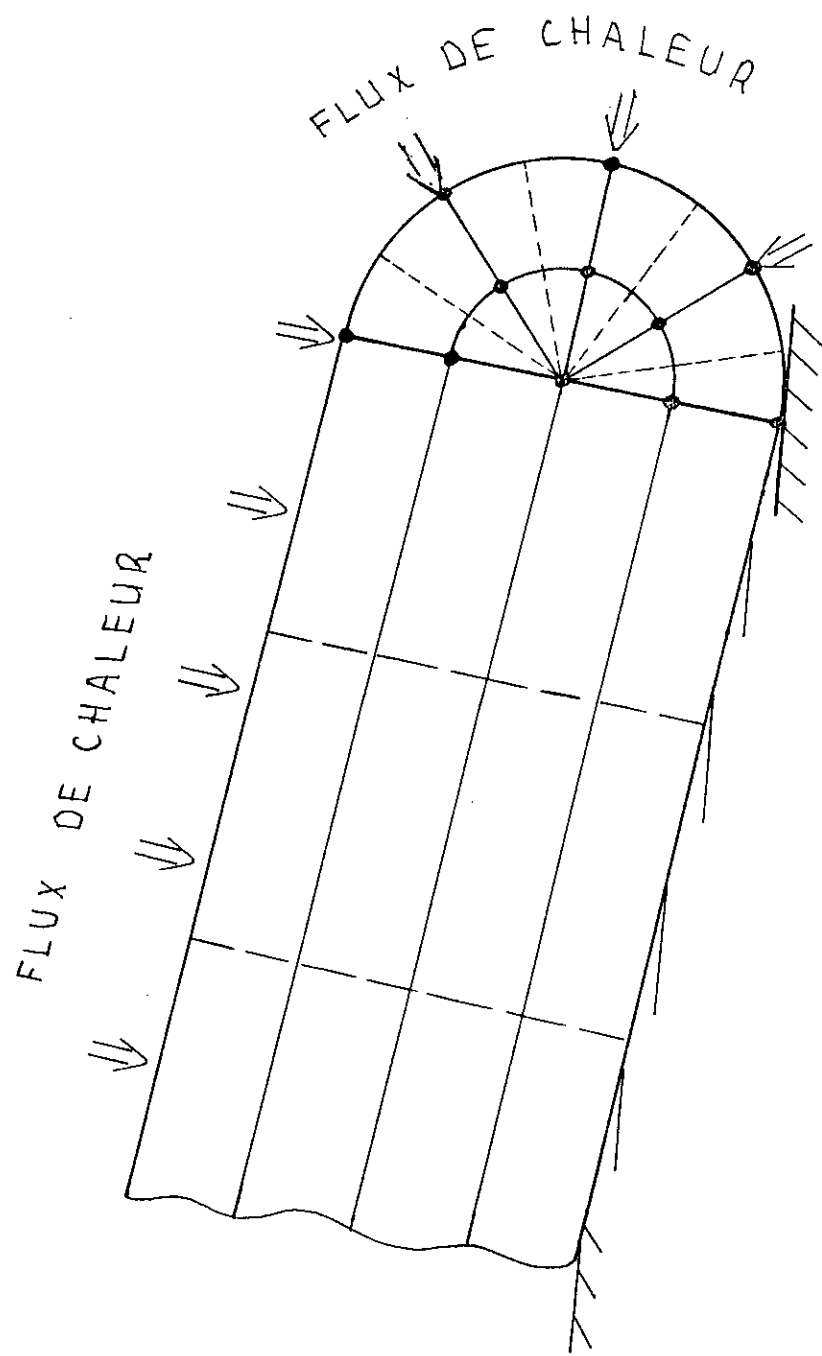


Fig IV.6 Disposition horizontale de l'éprouvette dans Le four

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

(IV.15)

Les dimensions des volumes de contrôle se réduisent donc aux dimensions  $\Delta r$  et  $\Delta \theta$ ;  $\Delta z$  sera pris comme dimension unitaire. (cf. fig IV.7).

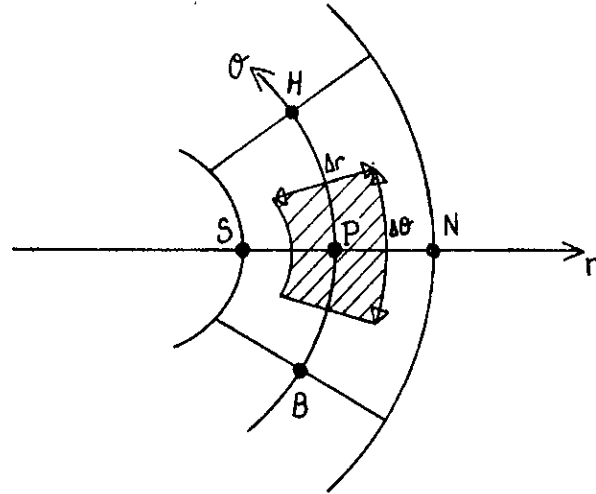


Fig IV.7: Volume de contrôle d'un noeud P.

Un point P (i,j) sera donc entouré de quatre voisins : N, S, H, et B.

Soient R et  $\theta$  respectivement le rayon et la circonférence de l'éprouvette:

$$\begin{cases} R = 0,03 \text{ mètres} \\ \theta = 180 \text{ degrés.} \end{cases}$$

Vu ces dimensions et vu les caractéristiques thermiques de l'acier XC 42, le maillage (discrétisation du domaine) pour lequel on a opté est celui qui considère cinq (05) noeuds suivant  $\theta$  et trois (03) suivant R. (cf. fig IV.8).

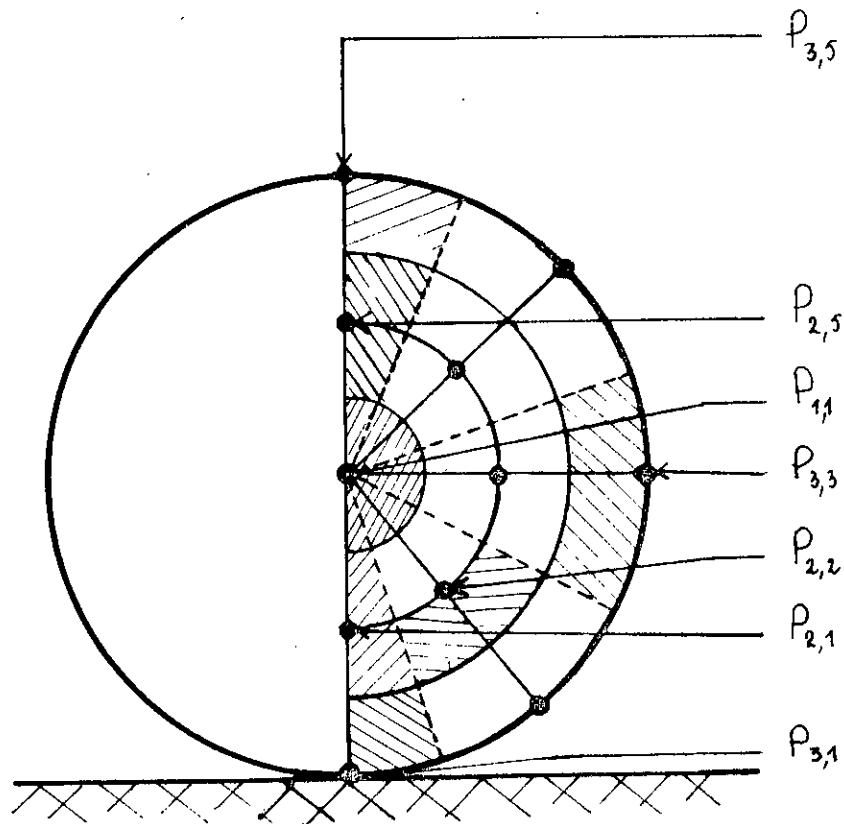


Fig IV.8: Discrétisation du domaine.

Soient  $M$  et  $N$  respectivement le nombre de noeuds suivant la direction  $r$ , ( $M = 3$ ) et le nombre de noeuds suivant  $\theta$ , ( $N = 5$ ).

Il est évident que  $\Delta r = \frac{R}{M - 1}$  et que  $\Delta \theta = \frac{\theta}{N - 1}$ .

Une correspondance entre la température de ces noeuds et celles considérés lors de l'étude expérimentale est donnée par le tableau suivant:

$T(1,1)$	→	Tc1	$T(3,1)$	→	Tc7
$T(2,1)$	→	Tc2	$T(3,2)$	→	Tc (non utilisé)
$T(2,2)$	→	Tc3	$T(3,3)$	→	Tc8
$T(2,3)$	→	Tc4	$T(3,4)$	→	Tc (non utilisé)
$T(2,4)$	→	Tc5	$T(3,5)$	→	Tc9
$T(2,5)$	→	Tc6			

#### IV-7 Conditions initiales :

A l'instant initial  $t_0 = 0$ , la température de l'éprouvette et de l'enceinte du four sont prises égales à 25 °C pour chaque mode de chauffage.

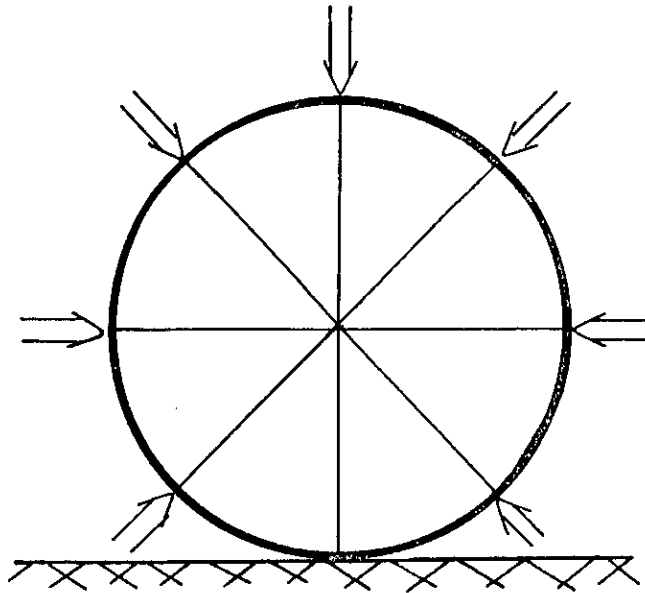
Ainsi, tous les points considérés de l'éprouvette, quelle que soit leur position, sont à la température ambiante juste avant de démarrer le four.

#### IV-8 Conditions aux limites :

Au cours du chauffage, l'éprouvette cylindrique est soumise à un flux de rayonnement et de convection (*naturelle, dans le cas du four à gaz et forcée dans le cas du four électrique*).

La chaleur transmise par le corps de chauffe et les parois du four vient lécher les parois latérales de l'éprouvette, puis s'écoule par conduction de molécule en molécule à l'intérieur de celle-ci pour élever progressivement sa température.

De toute évidence, les points situés sur cette paroi sont régis à la fois par l'équation de conduction et celle du flux convectif et rayonnant. Par conséquent, leur température est, à chaque instant, fonction de la température des noeuds voisins, et de celle de l'environnement (enceinte du four), comme l'indique la figure suivante:



⇒ : FLUX CONVectif ET RAYONNANT

Fig IV.9: Mécanisme de transfert de chaleur sur la paroi latérale de l'éprouvette.

A ce niveau, l'équation de conduction doit s'égaliser avec celle du flux convectif et rayonnant [6,54,34] telle que:

$$q = -k_N \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_N = h \cdot (T_F - T_P) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_F^4 - T_P^4). \quad (\text{IV.16})$$

$$q_{\text{conduction}} = q_{\text{convection}} + q_{\text{rayonnement}}$$

On remarque que la température dans l'équation de Stéffan-Boltzmann relative au flux rayonnant est en puissance 4. Cette équation, par conséquent doit être linéarisée [6].

#### IV-8-1 Linéarisation de l'équation du rayonnement :

La linéarisation consiste à utiliser un développement limité du premier degré du type:  $f(x) = f(x_0) + (x-x_0).f'(x_0)$ , en vue d'avoir une équation linéaire en  $T_p$ . Les températures  $T_p^0$  et  $T_f$  étant connues.

$$\begin{aligned}
 q_r &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_f^4 - T_p^4) \\
 &= q_0 + (T_p - T_p^0) \cdot \left( \frac{dq}{dT_p} \right)_{T_p^0} \\
 &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_f^4 - T_p^0^4) - 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_p - T_p^0) \cdot (T_p^0)^3 \\
 &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_f^4 - T_p^0^4) + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_p^0)^3 - 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_p^0)^3 \cdot T_p \\
 &= (-4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_p^0)^3) \cdot T_p + 3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_p^0)^3 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_f^4)
 \end{aligned}$$

L'expression linéarisée du flux convectif et rayonnant s'écrit désormais comme suit :

$$q = -\left( h + 4 \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_p^0)^3 \right) \cdot T_p + h \cdot T_f + 3 \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_p^0)^3 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_f^4)$$

(IV.17).

Les conditions aux limites sont donc subordonnées à cette équation linéarisée du flux convectif et rayonnant. Néanmoins, suivant le type de four et de chauffage, les différents paramètres doivent être connus, calculés ou estimés en utilisant soit des relations empiriques soit des expressions numériques ou bien tout simplement des tables appropriées.



L'émissivité  $\epsilon$ , produit de l'émissivité  $\epsilon_1$  du corps de chauffe par  $\epsilon_2$  de l'éprouvette cylindrique en acier oxydé est déterminée par des tables [2,17,61], et sa valeur moyenne est prise égale à 0,8.

Par cōtre, le facteur d'échange par rayonnement F et le coefficient de convection h ont, quant à eux, nécessité des investigations conduisant à leur estimation convenable.

#### IV-7-1 Détermination du coefficient de convection h :

La détermination rationnelle par des méthodes numériques du coefficient de convection est très complexe; en effet, notons que l'expression la plus complète comporte au moins une douzaine de paramètres dont la plupart requiert une analyse fastidieuse et détaillée [1,3,62].

Nous avons, en conséquence, jugé préférable et judicieux de nous servir des formules semi-empiriques qui ne manquent pas tellement d'efficacité dans le domaine de la thermique appliquée aux fours. La littérature [62,3,1] a permis d'opter pour les formules suivantes:

\*\* Dans le cas du four à gaz :

$$h = \left[ 7,4 + 9,24 \cdot 10^{-3} ( T_F - 273 ) \right] \cdot \frac{w^{0,65}}{d^{0,25}} \quad (\text{kcal/m. h. } ^\circ\text{k})$$

(IV.18)

- où :  $T_F$  : Température de la fumée dans le four [ $^\circ\text{k}$ ]  
 $w$  : Vitesse d'écoulement de la chaleur par le brûleur;  
 = 40 m/s dans notre cas.  
 $d$  : Diamètre des éprouvettes [m];  
 = 0,06 m.

\*\* Dans le cas du four électrique :

$$h = \left[ 5,8 + 11,2 \cdot 10^{-3} ( T_F - 273 ) \right] \cdot \frac{w^{0,65}}{d^{0,25}} \quad (\text{kcal/m. h. } ^\circ\text{k}) \quad (\text{IV.19})$$

où:  $T_F$ : Température à l'intérieur du four [ $^\circ\text{k}$ ]

w: Vitesse de circulation de l'air sous l'action du ventilateur;  $w = 65 \text{ m/s}$  dans notre cas.

**IV-7-2 Détermination du coefficient F d'échange par rayonnement :**

Ce facteur F est fonction de la position de la zone considérée de l'éprouvette par rapport à l'élément de chauffe. Il caractérise la quantité de chaleur échangée (reçue).

Lorsque l'unité de surface considérée de la charge est parfaitement en regard avec le corps de chauffe, celle-ci reçoit directement de la chaleur et F est important. Si par cōtre, la surface est "cachée", F prend des valeurs de plus en plus faibles car la quantité de chaleur reçue n'est que celle réfléchiée par les parois du four [2,17,61].

Dans le cas le plus favorable, F est proche de l'unité. On considère la valeur de 0,95 comme valeur maximale.

Dans le cas du four à gaz où le chauffage s'efféctue par le brûleur situé sur la paroi supérieure, on admet que F varie selon l'expression suivante:

$$F_j = \frac{F}{(N - 1)} \cdot (j - 1). \quad \text{avec } F = 0,95. \quad (\text{IV.20})$$

j: représente la position du point (noeud) considéré et N le nombre de noeuds suivant la direction  $\theta$ .

Dans le cas du four électrique où les résistances sont fixées sur les murs latéraux, la paroi extérieure de l'éprouvette reçoit donc la quasi totalité de la chaleur émise; et par conséquent, F prend la valeur constante de 0,95.

#### IV-8 Etablissement du système d'équations:

Comme indiqué précédemment, l'équation différentielle de conduction en régime transitoire (IV.6) se réduit à une équation à deux dimensions r et  $\theta$ , et s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \cdot (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) \cdot \Delta\theta = \\ = \int_t^{t+\Delta t} \left\{ k_N \cdot r_N \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_n - k_S \cdot r_S \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_s \right\} \cdot \Delta\theta \cdot dt \\ \int_t^{t+\Delta t} \left\{ \frac{k_H}{r_H} \left( \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_h - \frac{k_B}{r_B} \left( \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_b \right\} \cdot \Delta r \cdot dt \end{aligned}$$

(IV.21).

A été utilisé le terme  $r_p$  au lieu de  $r_H$  et  $r_B$ , en effet les trois noeuds P, H et B se trouvent sur la même circonférence et ont par conséquent le même rayon  $r_p$ .

Après avoir discrétisé le domaine (éprouvette) en un ensemble de noeuds  $P_{i,j}$  ( $i = \overline{1,3}$  et  $j = \overline{1,5}$ ), la méthode des différences finies attribue à chacun des noeuds une équation discrète représentant l'évolution de sa température.

Pour cette mise en équations, nous avons utilisé la méthode dite de PEACEMAN et RACHFORD (A.D.I.).



1<sup>ère</sup> étape :  $t \longrightarrow t + \frac{\Delta t}{2}$  : implicite en  $r$ , explicite en  $\theta$

$$a_{ij} X_{ij} = b_{i+1j} X_{i+1j} + c_{i-1j} X_{i-1j} + d_{i+1j} T_{i+1j} + e_{i-1j} T_{i-1j} \\ + f_{ij} T_{ij} + g$$

soit,

$$\boxed{A_{ij} X_{ij} = B_{ij} X_{i+1j} + C_{ij} X_{i-1j} + D_{ij}} \quad (\text{IV.22})$$

avec :

$$A_{ij} = a_{ij} \quad ; \quad B_{ij} = b_{ij} \quad ; \quad C_{ij} = c_{ij} \quad ;$$

$$D_{ij} = d_{i+1j} T_{i+1j} + c_{i-1j} T_{i-1j} + f_{ij} T_{ij} + g$$

2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \longrightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en  $r$

$$a'_{ij} X_{ij} = b'_{i+1j} X_{i+1j} + c'_{i-1j} X_{i-1j} + d'_{i+1j} T_{i+1j} + e'_{i-1j} T_{i-1j} \\ + f'_{ij} T_{ij} + g'$$

soit,

$$\boxed{A'_{ij} X_{ij} = B'_{ij} X_{i+1j} + C'_{ij} X_{i-1j} + D'_{ij}} \quad (\text{IV.23})$$

avec :

$$A'_{ij} = a'_{ij} \quad ; \quad B'_{ij} = b'_{ij} \quad ; \quad C'_{ij} = c'_{ij}$$

$$D'_{ij} = d'_{i+1j} T_{i+1j} + c'_{i-1j} T_{i-1j} + f'_{ij} T_{ij} + g'$$

2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \rightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en  $r$

Une formulation des équations sous la forme donnée précédemment, on obtient :

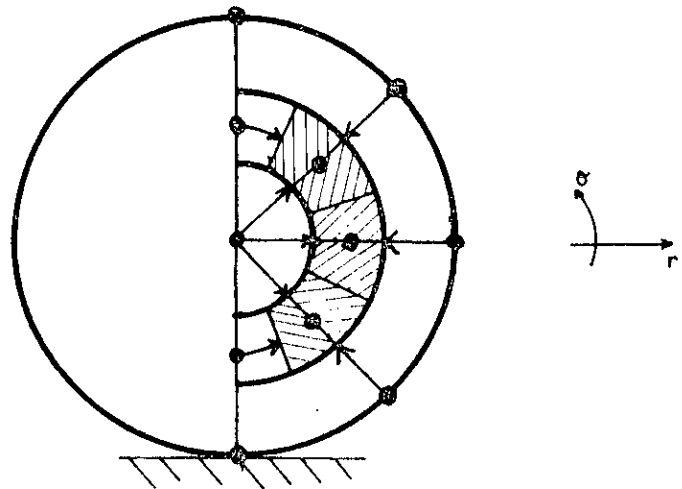
$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_P (r_N^2 - r_S^2) \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\Delta t} + \frac{k_H \cdot \Delta r_H}{\Delta \theta \cdot r_P} + \frac{k_B \cdot \Delta r_B}{\Delta \theta \cdot r_P} \right] \cdot X_P = \\
 & = \left[ \frac{k_H \cdot \Delta r_H}{\Delta \theta \cdot r_P} \right] \cdot X_H + \left[ \frac{k_B \cdot \Delta r_B}{\Delta \theta \cdot r_P} \right] \cdot X_B + \left[ \frac{k_N \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r_N} \right] \cdot T_N + \left[ \frac{k_S \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r_S} \right] \cdot T_S \\
 & + \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_P (r_N^2 - r_S^2) \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\Delta t} + \frac{k_N \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r_N} + \frac{k_S \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r_S} \right] \cdot T_P
 \end{aligned}$$

(IV.26).

1 - Nœuds internes:  $P_{ij}$

$$I = \overline{2, M-1}$$

$$J = \overline{2, N-1}$$



1<sup>ère</sup> étape :  $t \longrightarrow t + \frac{\Delta t}{2}$  : implicite en  $r$ , explicite en  $\theta$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \cdot \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\Delta t} \cdot (X_{i,j} - T_{i,j}) = \\ & = \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} (X_{i+1,j} - X_{i,j}) - \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} (X_{i,j} - X_{i-1,j}) \\ & \quad + \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} (T_{i,j+1} - T_{i,j}) - \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} (T_{i,j} - T_{i,j-1}) \end{aligned}$$

soit, après formulation :

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\Delta t} + \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} + \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] X_{i,j} = \\ & = \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{i+1,j} + \left[ \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{i-1,j} + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] T_{i,j+1} + \\ & + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] T_{i,j-1} + \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\Delta t} + \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] T_{i,j} \end{aligned}$$

(IV.27)

2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \rightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en  $r$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \cdot \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\Delta t} \cdot (X_{i,j} - T_{i,j}) = \\ & = \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} (X_{i,j+1} - X_{i,j}) - \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} (X_{i,j} - X_{i,j-1}) \\ & + \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} (T_{i+1,j} - T_{i,j}) - \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) \end{aligned}$$

ce qui permet d'écrire, après formulation :

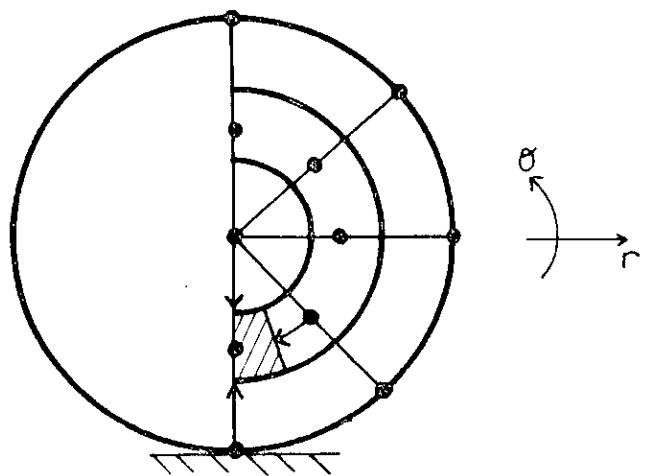
$$\begin{aligned} & \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\Delta t} + \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] \cdot X_{i,j} = \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] \cdot X_{i,j+1} + \\ & + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] X_{i,j-1} + \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{i+1,j} + \left[ \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{i-1,j} + \\ & + \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\Delta t} + \frac{k \cdot \Delta \theta}{\Delta r} (r_N + r_S) \right] T_{i,j} \end{aligned}$$

(IV.28)

2 - Nœuds inférieurs:  $P_{i1}$

$$I = 2, M - 1$$

$$J = 1$$





1<sup>ère</sup> étape :  $t \longrightarrow t + \frac{\Delta t}{2}$  : implicite en  $r$ , explicite en  $\theta$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \cdot \frac{2 \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta t} \cdot (X_{i,1} - T_{i,1}) = \\ & = \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (X_{i+1,1} - X_{i,1}) - \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (X_{i-1,1} - X_{i,1}) \\ & + \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} (T_{i,j+1} - T_{i,j}). \end{aligned}$$

soit, après écriture sous la forme (IV.22),

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \frac{k \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (r_N + r_S) \right] X_{i,1} = \\ & = \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{i+1,1} + \left[ \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{i-1,1} + \left[ \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] \cdot T_{i,2} + \\ & + \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{\Delta \theta}{\Delta t} - \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] \cdot T_{i,1} \end{aligned}$$

(IV.29)

2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \longrightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en  $r$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \cdot \frac{2 \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta t} \cdot (X_{i,1} - T_{i,1}) = \\ & \left[ \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} (X_{i,j+1} - X_{i,j}) \right] + \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (T_{i+1,1} - T_{i,1}) \right] + \\ & \left[ \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (T_{i-1,1} - T_{i,1}) \right]. \end{aligned}$$

Ce qui donne: (IV.30)

$$\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] \cdot X_{i,1} =$$

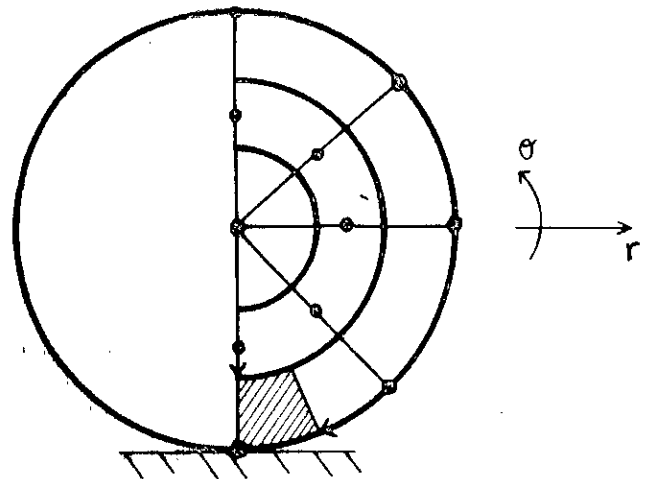
$$\left[ \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] \cdot X_{i,2} + \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{i+1,1} + \left[ \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{i-1,1} +$$

$$\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{\Delta \theta}{\Delta t} - \frac{k \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (r_N - r_S) \right] \cdot T_{i,1}$$

3 - Noeuds de la base :  $P_{M,1}$

$$I = M$$

$$J = 1$$



Ces températures sont mesurées expérimentalement, car elles constituent l'une des conditions aux limites.

1<sup>ère</sup> étape :  $t \longrightarrow t + \frac{\Delta t}{2}$  : implicite en  $r$ , explicite en  $\theta$

$$X_{M,1} = \frac{1}{2} ( T_{\text{Paroi}}^{t+\Delta t} + T_{\text{Paroi}}^t )$$

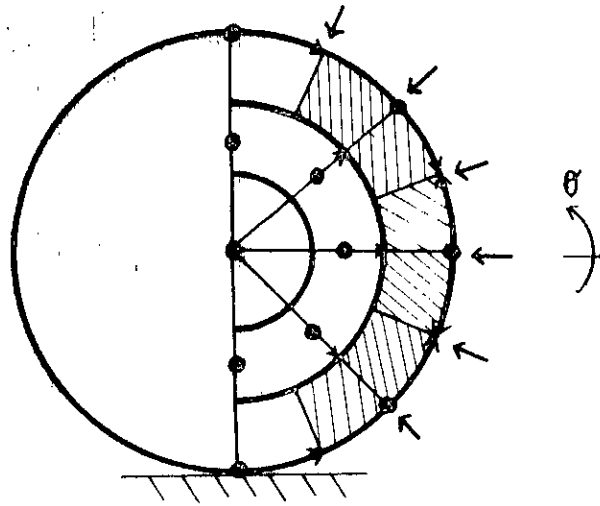
2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \longrightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en  $r$

$$X_{M,1} = T_{\text{Paroi}}^{t+\Delta t}$$

4 - Noeuds latéraux :  $P_{M,J}$

$$I = M$$

$$J = \frac{N-1}{2}$$



Ces noeuds sont lèchés par le flux convectif et rayonnant, et obéissent par conséquent à la loi linéarisée (IV.17) et à l'équation de conduction (IV.2).

1<sup>ère</sup> étape :  $t \longrightarrow t + \frac{\Delta t}{2}$  : implicite en  $r$ , explicite en  $\theta$

$$\rho \cdot C_P \left[ \left( R + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \left( R - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right] \cdot \frac{\Delta \theta}{\Delta t} ( X_{M,J} - T_{M,J} ) =$$

$$r_N \cdot \Delta \theta \cdot \left[ - ( h + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,J}^3 ) \cdot X_{M,J} + h \cdot X_F + 3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,J}^4 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_F^4 \right] +$$

$$\left[ \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} ( X_{M,J} - X_{M-1,J} ) \right] + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot \Delta \theta \cdot r_p} ( T_{M,J+1} - T_{M,J} ) \right] +$$

$$\left[ \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot \Delta \theta \cdot r_p} ( T_{M,J} - T_{M,j-1} ) \right]$$

ce qui revient à écrire :

$$\begin{aligned}
& \left[ \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + r_N \cdot \Delta \theta \cdot (h + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,J}^3) + \dots \right. \\
& \qquad \qquad \qquad \left. \dots + \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{M,J} = \\
& \left[ \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{M-1,J} + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot T_{M,J+1} + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot T_{M,J-1} + \\
& \left[ \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + 3 \cdot r_N \cdot \Delta \theta \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,J}^3 - \dots \right. \\
& \qquad \qquad \qquad \left. \dots \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot T_{M,J} + (r_N \cdot \Delta \theta \cdot h) \cdot X_F + (r_N \cdot \Delta \theta \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F) \cdot T_F
\end{aligned}$$

(IV.31)

2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \rightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en  $r$

$$\begin{aligned}
& \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} (X_{M,J} - T_{M,J}) = \\
& r_N \cdot \Delta \theta \left[ -(h + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,J}^3) \cdot T_{M,J} + h \cdot T_F + 3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,J}^4 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_F^4 \right] - \\
& \left[ \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} (T_{M,J} - T_{M-1,J}) \right] + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot \Delta \theta \cdot r_p} (X_{M,J+1} - X_{M,J}) \right] - \\
& \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot \Delta \theta \cdot r_p} (X_{M,J} - X_{M,J-1}) \right].
\end{aligned}$$

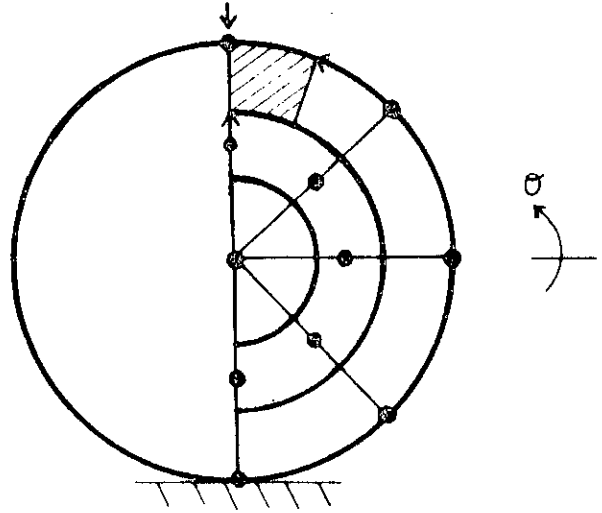
ce qui revient à écrire : (IV.32)

$$\begin{aligned}
 & \left[ \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot X_{M,J} = \\
 & \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot X_{M,J+1} + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{2 \cdot R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot X_{M,J-1} + \left[ \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{M-1,J} + \\
 & \left[ \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} - R \cdot \Delta \theta (h + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,J}^3) - \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{M,J} \\
 & + r_N \cdot \Delta \theta \cdot (h \cdot T_F + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_F^4) .
 \end{aligned}$$

5 - Noeuds du sommet : P<sub>MN</sub>

I = M

J = N



1<sup>ère</sup> étape :  $t \longrightarrow t + \frac{\Delta t}{2}$  : implicite en  $r$ , explicite en  $\theta$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} (X_{M,N} - T_{M,N}) = \\
 & r_N \cdot \frac{\Delta \theta}{2} \left[ -(h + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,N}^3) \cdot X_{M,N} + h \cdot X_F + 3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,N}^4 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_F^4 \right] - \\
 & \left[ \frac{k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} (X_{M,N} - X_{M-1,N}) \right] + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} (T_{M,N-1} - T_{M,N}) \right] .
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + r_N \frac{\Delta \theta}{2} (h + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,N}^3) + \dots \right. \\
& \qquad \qquad \qquad \left. \dots + \frac{k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{M,N} = \\
& \left[ \frac{k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{M-1,N} + R \cdot \Delta \theta \cdot (h \cdot T_F + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_F^4) + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot X_{M,N-1} + \\
& \left[ \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} - R \cdot \Delta \theta (h + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,N}^3 - \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r}) \right] \cdot T_{M,N}
\end{aligned}$$

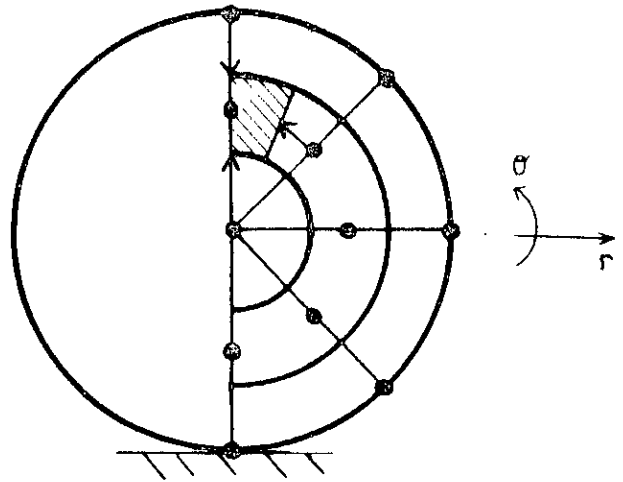
2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \rightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en  $r$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} (X_{M,N} - T_{M,N}) = \\
& r_N \frac{\Delta \theta}{2} \left[ -(h + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,N}^3) \cdot T_{M,N} + h \cdot T_F + 3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,N}^4 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_F^4 \right] - \\
& \left[ \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} (T_{M,N} - T_{M-1,N}) \right] + \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot R} (X_{M,N-1} - X_{M,N}) \right] -
\end{aligned}$$

ce qui revient à écrire : (IV.34)

$$\begin{aligned}
& \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \frac{k \cdot \Delta r}{R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot X_{M,N} = \\
& \left[ \frac{k \cdot \Delta r}{R \cdot \Delta \theta} \right] \cdot X_{M,N-1} + \left[ \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{M-1,N} + \\
& \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \left[ 2 \cdot R \cdot \Delta r \right] \frac{\Delta \theta}{\Delta t} - r_N \cdot \Delta \theta (h + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_{M,N}^3 - \frac{2 \cdot k \cdot r_s \cdot \Delta \theta}{\Delta r}) \right] \cdot T_{M,N} \\
& + r_N \cdot \Delta \theta \cdot (h \cdot T_F + \varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot T_F^4) .
\end{aligned}$$

6 - Noeuds supérieurs : P



$$I = 2, M-I$$

$$J = N$$

1<sup>ère</sup> étape :  $t \longrightarrow t + \frac{\Delta t}{2}$  : implicite en  $r$ , explicite en  $\theta$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho \cdot C_P (r_N^2 - r_S^2) \cdot \frac{2 \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta t} \cdot (X_{iN} - T_{iN}) = \\ & = \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (X_{i+1,N} - X_{iN}) - \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (X_{i-1,N} - X_{iN}) \right] \\ & + \left[ \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_P} (T_{i,N+1} - T_{i,N}) \right] \end{aligned}$$

soit, après écriture sous la forme (IV.22),

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_P (r_N^2 - r_S^2) \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \frac{k \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (r_N + r_S) \right] X_{iN} = \\ & = \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{i+1,N} + \left[ \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{i-1,N} + \left[ \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_P} \right] \cdot T_{i,N+1} + \\ & + \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_P (r_N^2 - r_S^2) \frac{\Delta \theta}{\Delta t} - \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_P} \right] \cdot T_{iN} \end{aligned}$$

2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \rightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en  $r$

$$\frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \cdot \frac{2 \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta t} \cdot (X_{i,N} - T_{i,N}) =$$

$$\left[ \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} (X_{i,N-1} - X_{i,N}) \right] + \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (T_{i+1,N} - T_{i,N}) \right] +$$

$$\left[ \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (T_{i-1,N} - T_{i,N}) \right].$$

ce qui donne : (IV.36)

$$\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] \cdot X_{i,N} =$$

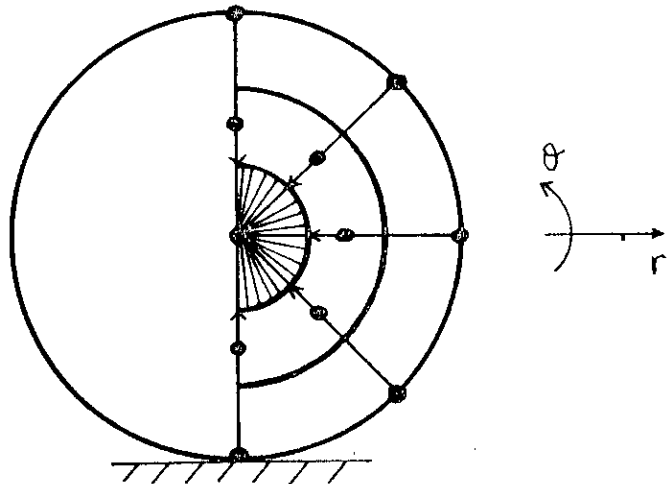
$$\left[ \frac{2 \cdot k \cdot \Delta r}{\Delta \theta \cdot r_p} \right] \cdot X_{i,N-1} + \left[ \frac{k \cdot r_N \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{i+1,N} + \left[ \frac{k \cdot r_S \cdot \Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot T_{i-1,N} +$$

$$\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot C_p (r_N^2 - r_S^2) \frac{\Delta \theta}{\Delta t} - \frac{k \cdot \Delta \theta}{2 \cdot \Delta r} (r_N - r_S) \right] \cdot T_{i,N}.$$

7 - Noeuds du centre : P<sub>1,1</sub>

$$I = 1$$

$$J = 1$$





Le calcul de la température du noeud central P est assez délicat. Suivant la précision voulue, plusieurs méthodes plus ou moins complexes sont proposées. D'après [18,39], la méthode la plus rationnelle consiste en :

1<sup>ère</sup> étape :  $t \longrightarrow t + \frac{\Delta t}{2}$  : implicite en r, explicite en  $\theta$

$$\sum_{J=1}^N k \cdot r_N \frac{X_{2,J} - X_{1,1}}{\Delta r} \cdot \Delta \theta = \rho \cdot C_P \cdot r_N^2 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} (X_{1,1} - T_{1,1})$$

Ce qui revient à écrire sous la forme (IV.22):

$$\left[ \rho \cdot C_P \cdot r_N^2 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \sum_{J=1}^N k \cdot r_N \frac{\Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{1,1} =$$

$$\left[ \sum_{J=1}^N k \cdot r_N \frac{\Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{2,J} + \left[ \rho \cdot C_P \cdot r_N^2 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right] \cdot T_{1,1}$$

(IV.37)

2<sup>ème</sup> étape :  $t + \frac{\Delta t}{2} \longrightarrow t$  : implicite en  $\theta$ , explicite en r

$$\sum_{J=1}^N k \cdot r_N \frac{X_{2,J} - X_{1,1}}{\Delta r} \cdot \Delta \theta = \rho \cdot C_P \cdot r_N^2 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} (X_{1,1} - T_{1,1})$$

Ce qui revient à écrire sous la forme (IV.22):

$$\left[ \rho \cdot C_P \cdot r_N^2 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} + \sum_{J=1}^N k \cdot r_N \frac{\Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{1,1} =$$

$$\left[ \sum_{J=1} k \cdot r_N \frac{\Delta \theta}{\Delta r} \right] \cdot X_{2,J} + \left[ \rho \cdot C_P \cdot r_N^2 \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right] \cdot T_{1,1}$$

(IV.38)

#### IV-9-3 Résolution par la méthode T.D.M.A.

La solution du système d'équations discrétisées par la méthode A.D.I, s'obtient commodément par l'algorithme de THOMAS, appelé couramment méthode T.D.M.A (Tri Diagonal Mairix Algorithm). Cette nomination revient au fait que les coefficients non nuls s'alignent sur les trois diagonales de la matrice qui découle du système sus-cité.

Dans le cas bidimensionnel en coordonnées cylindriques, et pour des raisons de principe de fonctionnement de l'algorithme, il convient d'écrire le système d'équations sous la forme (IV.22,23). (Pour plus de détails, voir parag IV.8 et [6]).

Dans notre cas, le principe de la méthode T.D.M.A, consiste à injecter pour chaque étape, la température connue du noeud de la génératrice inférieure (déterminée expérimentalement) dans le système d'équations et de déterminer l'ensemble des autres températures par le processus de substitution.

Pour la première étape (*implicite en r, explicite en  $\theta$* ), cette température n'est fonction que de celle du point précédent dans la direction r. Inversement, celle-ci sera donc calculée via la température donnée par l'expérience.

On écrit que:

$$X_{i,j} = P_{i,j} \cdot X_{i+1,j} + Q_{i,j} \quad (\text{IV.39})$$

à partir de

$$X_{i-1,j} = P_{i-1,j} \cdot X_{i,j} + Q_{i-1,j} \quad (\text{IV.40})$$

La substitution de l'équation (IV.40) dans (IV.22) donne par conséquent:

$$a_{i,j} \cdot X_{i,j} = b_{i,j} \cdot X_{i+1,j} + c_{i,j} \cdot (P_{i-1,j} \cdot X_{i,j} + Q_{i-1,j}) + d_{i,j}$$

avec: 
$$P_{i,j} = \frac{b_{i,j}}{a_{i,j} - c_{i,j} \cdot P_{i-1,j}}$$

et

$$Q_{i,j} = \frac{d_{i,j} + c_{i,j} \cdot Q_{i-1,j}}{a_{i,j} - c_{i,j} \cdot P_{i-1,j}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } i = 1, M \\ j = 1, N \end{array} \right.$$

Cette récurrence, débute par:

$$P_{1,j} = \frac{b_{1,j}}{a_{1,j}} \quad \text{et} \quad Q_{1,j} = \frac{d_{1,j}}{a_{1,j}}$$

Pour la deuxième étape (*implicite en  $\theta$ , explicite en r*), on exprime la température du noeud de la génératrice inférieure en fonction de la température du noeud voisin dans la direction  $\theta$ .

L'application du processus de substitution tel que cité préalablement donne:

$$P_{i,j} = \frac{b_{i,j}}{a_{i,j} - c_{i,j} \cdot P_{i,j-1}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } i = 1, M \\ \quad \quad j = 1, N \end{array} \right.$$

$$Q_{i,j} = \frac{d_{i,j} + c_{i,j} \cdot Q_{i,j-1}}{a_{i,j} - c_{i,j} \cdot P_{i,j-1}}$$

En commençant bien évidemment par:

$$P_{i,1} = \frac{b_{i,1}}{a_{i,1}} \quad \text{et} \quad Q_{i,1} = \frac{d_{i,1}}{a_{i,1}}$$

L'application de cette méthode successivement aux deux étapes permet d'obtenir la température de chaque point de l'éprouvette après chaque itération considérée.

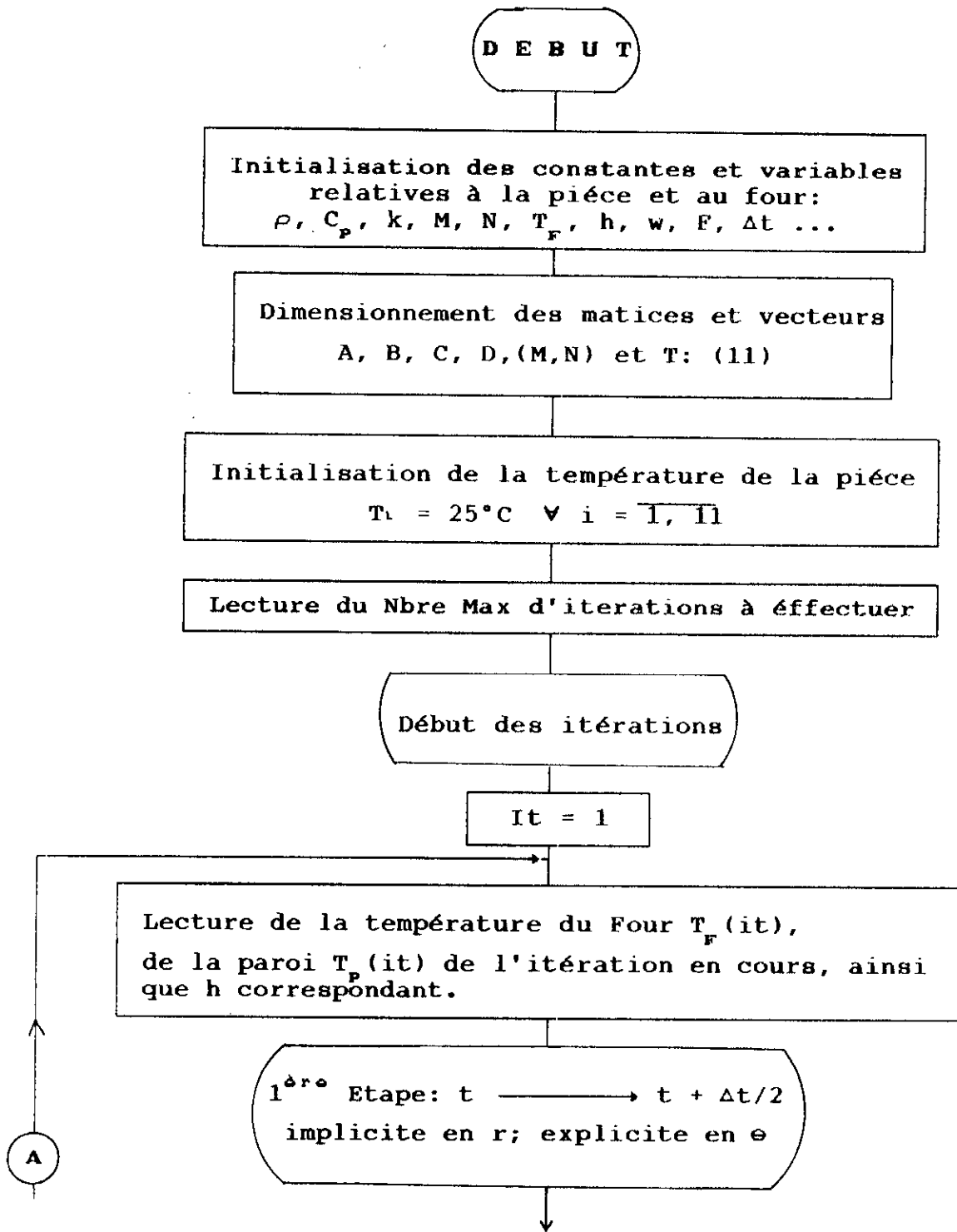
Ce processus est suivi par un test et prendra fin à l'atteinte du régime stationnaire.

#### IV-10 Organigramme général:

L'organigramme qui a conduit à l'élaboration du logiciel (LSDTC) de simulation de la distribution de température de la pièce cylindrique horizontale subissant un chauffage dans le four est assez complexe. A cet effet, nous avons jugé judicieux de le présenter de manière sommaire tout en faisant ressortir les étapes essentielles de l'algorithme.

Le logiciel a été écrit en langage Basic (GwBasic), réalisé sur un microordinateur compatible IBM. Il tient sur 1438 octets et est structuré en un programme principal qui fait appel à plusieurs sous programmes (Calcul de  $k$ ,  $C_p$ ,  $h$ , impression des résultats ...).

Notons que le temps mis par le logiciel pour traiter les quatre types de chauffage est de 03 minutes, soit environ 45 secondes par chauffage à raison de 25 itérations pour les 11 noeuds de l'éprouvette. Ce temps pourrait être réduit par l'utilisation d'une machine plus performante.



A

Etablissement du système d'équations par A.D.I:  
Pour chaque noeud  $P_{i,j}$  ;  $i=1, M$  et  $j=1, N$   
Calcul des  $A_{i,j}$ ,  $B_{i,j}$ ,  $C_{i,j}$ ,  $D_{i,j}$  et de  
 $C_p$ ,  $h$ ,  $F$ ,  $k$  pour chaque température

Résolution par T.D.M.A du système d'équations:  
 $A_{i,j} X_{i,j} = B_{i+1,j} X_{i+1,j} + C_{i-1,j} X_{i-1,j} + D_{i,j}$   
Les températures calculées sont rangées dans T(11)

Fin de la 1<sup>ère</sup> étape

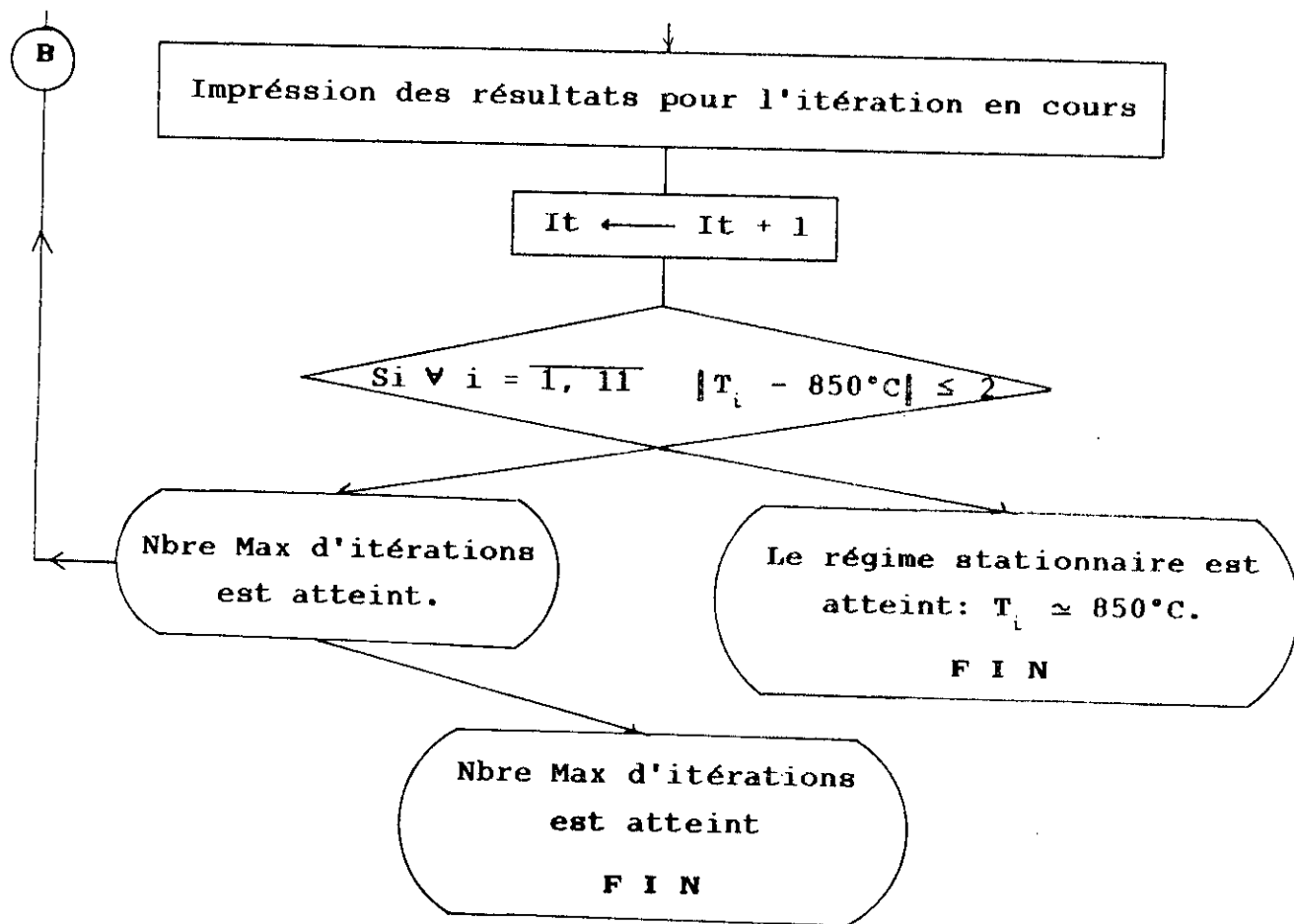
2<sup>ème</sup> Etape:  $t + \Delta t/2 \longrightarrow t + \Delta t$   
implicite en  $\theta$ ; explicite en  $r$

Etablissement du système d'équations par A.D.I  
Pour chaque noeud  $P_{i,j}$  ;  $i=1, M$  et  $j=1, N$   
Calcul des  $A'_{i,j}$ ,  $B'_{i,j}$ ,  $C'_{i,j}$ ,  $D'_{i,j}$  et de  
 $C_p$ ,  $h$ ,  $F$ ,  $k$  pour chaque température

Résolution du système d'équations:  
 $A'_{i,j} X_{i,j} = B'_{i,j+1} X_{i,j+1} + C'_{i,j-1} X_{i,j-1} + D'_{i,j}$   
Les températures calculées sont rangées dans T(11)

Fin de la 2<sup>ème</sup> étape

B





#### IV-11 Possibilités et limites du logiciel:

Dans le souci d'élargir son champ d'application et de diversifier son utilisation, le logiciel est conçu de manière paramétrable en ce sens qu'il peut simuler le processus sus-cité dans n'importe quel type de four (tubulaire, à chambre ...) sous toutes les conditions de chauffage (direct, indirect, à gaz, électrique, à convection forcée ...) sans limites de traitements ni de température.

Par ailleurs, tous les matériaux (aciers, fontes, alliages légers ...) peuvent être traités.

Dans notre cas, on a opté pour un maillage de 11 noeuds et des itérations de 5 en 5 minutes, cependant ces deux aspects peuvent être modifiés aisément par un maillage plus fin ou plus grossier, aussi l'incrémentation peut se faire par pas plus courts ou plus longs.

L'utilisation du logiciel pour un autre procédé similaire (four, traitement, matériau, temps ...) nécessite la connaissance de la température du four et de la paroi, de la vitesse de circulation de l'atmosphère ainsi que les paramètres thermiques du matériau.

Après avoir choisi le maillage convenable, un essai expérimental pourrait avoir lieu en vue d'une détermination plus rationnelle de certains paramètres et de la confirmation de certains autres.

Un autre avantage de ce logiciel est que le temps d'homogénéisation (voire le temps de maintien) des pièces à l'intérieur du four pourrait être connu avec une assez grande précision. Cette grandeur qui reste méconnue ou difficilement déterminable entraîne des pertes d'énergie ou de temps à cause des dépassements volontaires du temps exact requis par le traitement thermique exécuté.

Une contrainte majeure du modèle mathématique est qu'il est restreint aux seules géométries cylindriques horizontales.

Finalement, une option mérite d'être signalée: L'impression des résultats peut se faire simultanément sur écran et sur imprimante.



## V.1: Présentation des résultats numériques

Dans les quelques pages qui suivent, on présentera les résultats numériques donnés par le logiciel et qui sont représentés par:

- \*\* Un tableau de valeurs de la distribution de la température de la pièce cylindrique pour chaque type de chauffage.
- \*\* Les courbes représentatives correspondantes, tout en mettant en valeur le temps d'homogénéisation relatifs à chaque cas.

On signale que pour des raisons de clareté, tout comme nous l'avons fait dans la partie expérimentale, certaines courbes, en l'occurrence celles des noeuds  $P_{2,1}$ ,  $P_{2,2}$ ,  $P_{2,3}$ ,  $P_{2,4}$  ne sont pas représentées; néanmoins aucune exception ne sera faite lors de l'analyse de celles-ci.

Il y a lieu également de noter que les courbes  $T = f(t)$  sont représentées de la même manière que dans la partie expérimentale, ce qui conduit à une comparaison graphique plus significative.

A l'approche du régime stationnaire, chaque courbe passe par la moyenne des points en raison de la dispersion (de quelques °C) des résultats obtenus.

Le calcul prend fin dès que toutes les températures sont égales à  $850 \pm 2$  °C. Cette dernière valeur ( $\pm 2$  °C) est prise comme erreur de précision à ne pas dépasser par cette approche mathématique.

CHAUFFAGE TYPE " A "

\*\*\*\*\* SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE LORS DU CHAUFFAGE TYPE A \*\*\*\*\*

iter...	temps..	Tfour..	T(1,1)	T(2,1)	T(2,2)	T(2,3)	T(2,4)	T(2,5)	T(3,1)	T(3,2)	T(3,3)	T(3,4)	T(3,5)
num	h.mn	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	0.00	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
1	0.05	120	28	32	31	31	31	31	35	52	52	52	52
2	0.10	240	44	50	58	58	58	58	55	76	76	76	76
3	0.15	360	76	85	97	97	97	98	90	131	131	132	133
4	0.20	480	125	133	158	159	159	160	140	191	193	195	198
5	0.25	600	190	182	233	234	236	237	180	280	285	290	294
6	0.30	700	268	243	323	326	329	332	240	363	370	377	385
7	0.35	780	358	331	415	419	424	429	325	461	472	482	492
8	0.40	850	455	410	516	523	530	536	400	557	571	584	597
9	0.45	850	550	497	605	614	622	631	482	615	623	631	639
10	0.50	850	623	578	663	667	671	675	564	688	697	706	714
11	0.55	850	678	631	713	720	726	732	620	719	725	730	735
12	1.00	850	721	687	746	748	750	752	675	761	767	772	777
13	1.05	850	752	715	773	778	782	786	706	777	781	784	787
14	1.10	850	775	747	791	792	793	794	735	800	803	807	810
15	1.15	850	792	765	805	808	811	813	760	808	810	812	813
16	1.20	850	806	792	815	816	816	816	785	820	822	825	827
17	1.25	850	817	807	824	826	828	829	808	825	827	828	829
18	1.30	850	826	824	831	831	832	832	820	834	835	837	838
19	1.35	850	833	828	837	838	839	840	830	838	838	839	839
20	1.40	850	838	840	841	841	841	840	838	842	843	844	844
21	1.45	850	842	842	844	845	845	846	844	844	844	845	845
22	1.50	850	845	849	846	846	846	846	848	847	847	847	848
23	1.55	850	847	848	848	848	849	849	850	848	848	848	848
24	2.00	850	849	849	849	849	849	848	850	849	849	850	850

120

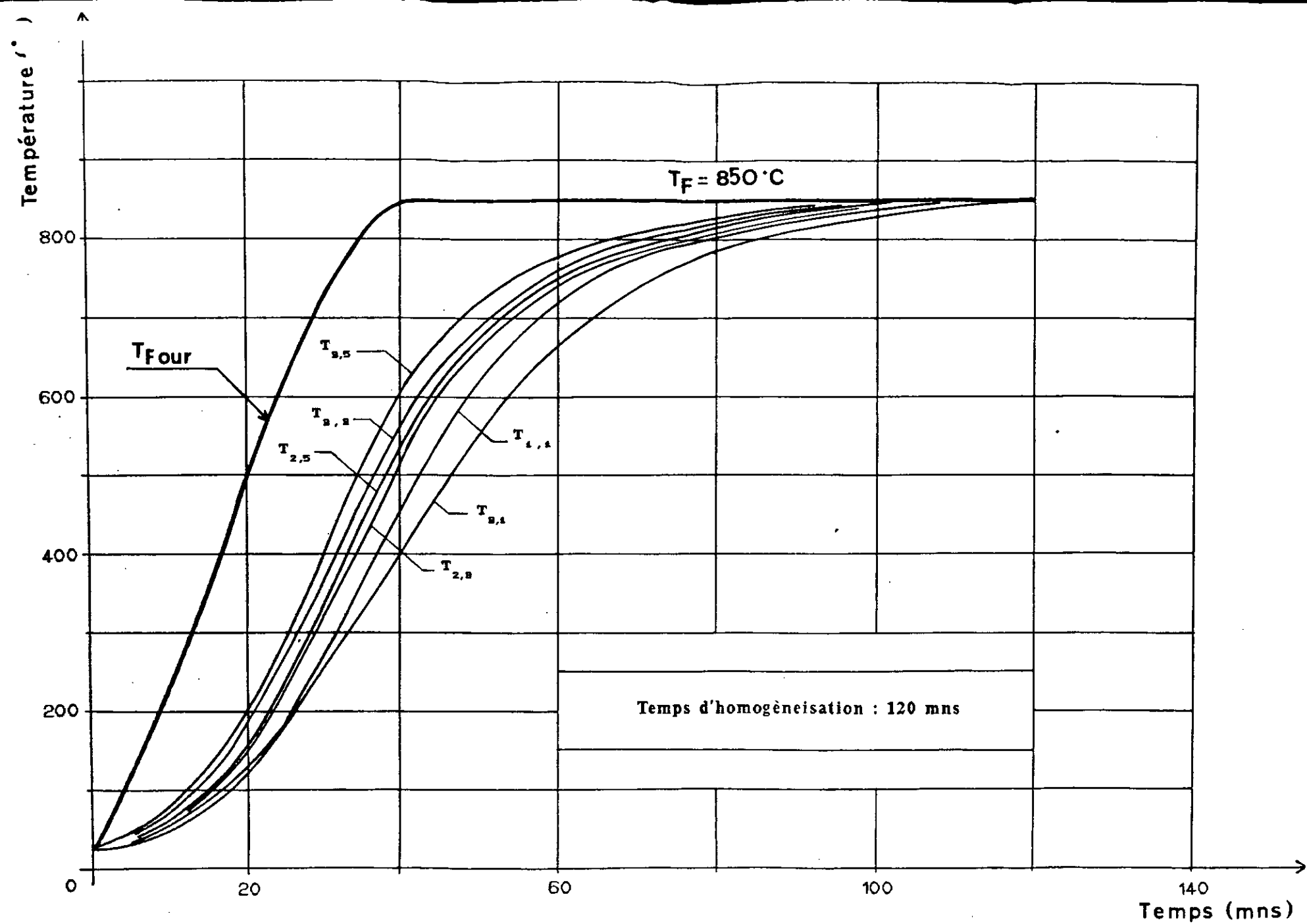


FIG V.1 : SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE TEMPERATURE DU CHAUFFAGE " A "

CHAUFFAGE TYPE " B "



\*\*\*\*\* SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE LORS DU CHAUFFAGE TYPE B \*\*\*\*\*

iter...	temps..	Tfour..	T(1,1)	T(2,1)	T(2,2)	T(2,3)	T(2,4)	T(2,5)	T(3,1)	T(3,2)	T(3,3)	T(3,4)	T(3,5)
num	h.mn	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	0.00	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
1	0.05	110	28	32	30	30	30	30	35	49	49	49	49
2	0.10	220	42	50	54	54	54	54	55	71	71	71	71
3	0.15	330	71	84	90	90	90	90	90	119	120	120	121
4	0.20	430	115	124	144	145	145	145	130	169	171	172	173
5	0.25	520	171	176	205	206	207	207	180	239	242	244	247
6	0.30	590	235	229	276	278	280	281	230	302	305	309	312
7	0.35	650	302	282	345	347	349	352	275	378	383	388	393
8	0.40	650	367	333	410	413	417	420	325	412	415	418	420
9	0.45	650	419	391	449	451	452	453	380	473	476	480	483
10	0.50	650	462	441	491	494	497	500	440	493	495	498	500
11	0.55	750	506	499	531	532	533	534	495	590	600	609	618
12	1.00	850	570	552	615	623	630	637	560	641	653	665	676
13	1.05	850	649	645	685	692	698	704	640	695	702	708	714
14	1.10	850	709	701	735	738	741	744	705	748	755	761	766
15	1.15	850	752	750	771	775	779	783	748	776	780	783	786
16	1.20	850	783	778	796	798	799	800	778	803	806	809	812
17	1.25	850	804	801	813	815	818	820	800	816	818	819	821
18	1.30	850	818	814	825	826	826	827	812	828	830	832	833
19	1.35	850	828	824	832	834	835	836	824	834	835	835	836
20	1.40	850	835	835	838	838	838	838	834	839	840	841	842
21	1.45	850	840	839	842	842	843	844	840	842	843	843	843
22	1.50	850	843	844	845	845	845	845	843	845	846	846	847
23	1.55	850	845	845	846	847	847	848	845	847	847	847	847
24	2.00	850	847	847	848	848	847	847	847	848	848	848	849
25	2.05	850	848	848	848	849	849	849	849	849	849	849	848
26	2.10	850	849	850	849	849	849	849	850	849	849	849	850

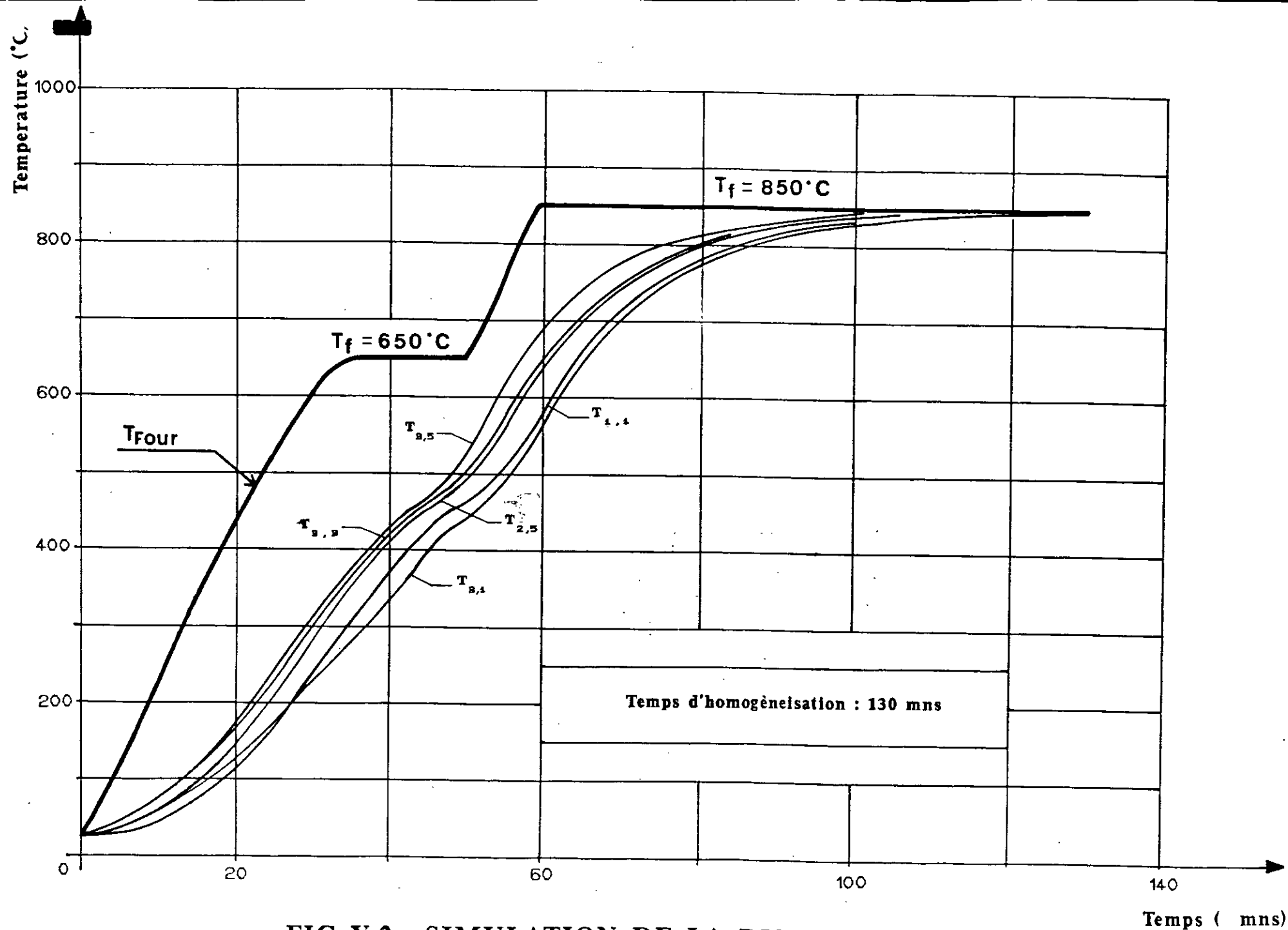


FIG V.2 : SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE  
TEMPERATURE DU CHAUFFAGE " B "

CHAUFFAGE TYPE " C "

\*\*\*\*\* SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE LORS DU CHAUFFAGE TYPE C \*\*\*\*\*

iter...	temps..	Tfour..	T(1,1)	T(2,1)	T(2,2)	T(2,3)	T(2,4)	T(2,5)	T(3,1)	T(3,2)	T(3,3)	T(3,4)	T(3,5)
num	h.mn	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	0.00	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
1	0.05	120	28	34	31	31	31	31	37	52	52	52	52
2	0.10	240	44	52	58	58	58	58	57	76	76	77	77
3	0.15	370	77	87	99	99	99	99	92	136	137	138	139
4	0.20	500	128	136	164	164	165	165	143	199	202	204	207
5	0.25	630	197	188	244	245	247	248	185	297	303	309	314
6	0.30	760	284	250	345	349	352	356	245	401	412	423	434
7	0.35	890	391	351	460	468	475	483	345	535	554	574	593
8	0.40	950	519	461	595	609	622	635	450	629	647	665	683
9	0.45	950	636	561	698	709	720	729	534	726	740	754	766
10	0.50	950	720	639	770	779	787	795	620	789	801	812	823
11	0.55	925	778	707	815	823	829	835	680	818	824	828	832
12	1.00	900	810	741	834	837	839	841	720	839	843	846	849
13	1.05	875	824	771	839	842	845	847	755	837	837	838	838
14	1.10	850	829	800	836	836	836	836	791	835	835	835	834
15	1.15	850	830	815	833	833	834	835	812	838	839	840	841
16	1.20	850	833	827	838	838	839	839	826	837	837	838	839
17	1.25	850	838	837	840	840	840	841	836	842	843	844	844
18	1.30	850	842	841	844	844	845	845	842	843	843	844	844
19	1.35	850	845	847	845	845	846	846	847	847	847	847	848
20	1.40	850	847	849	848	848	848	848	850	847	847	847	848
21	1.45	850	848	848	848	848	849	849	850	849	849	849	850

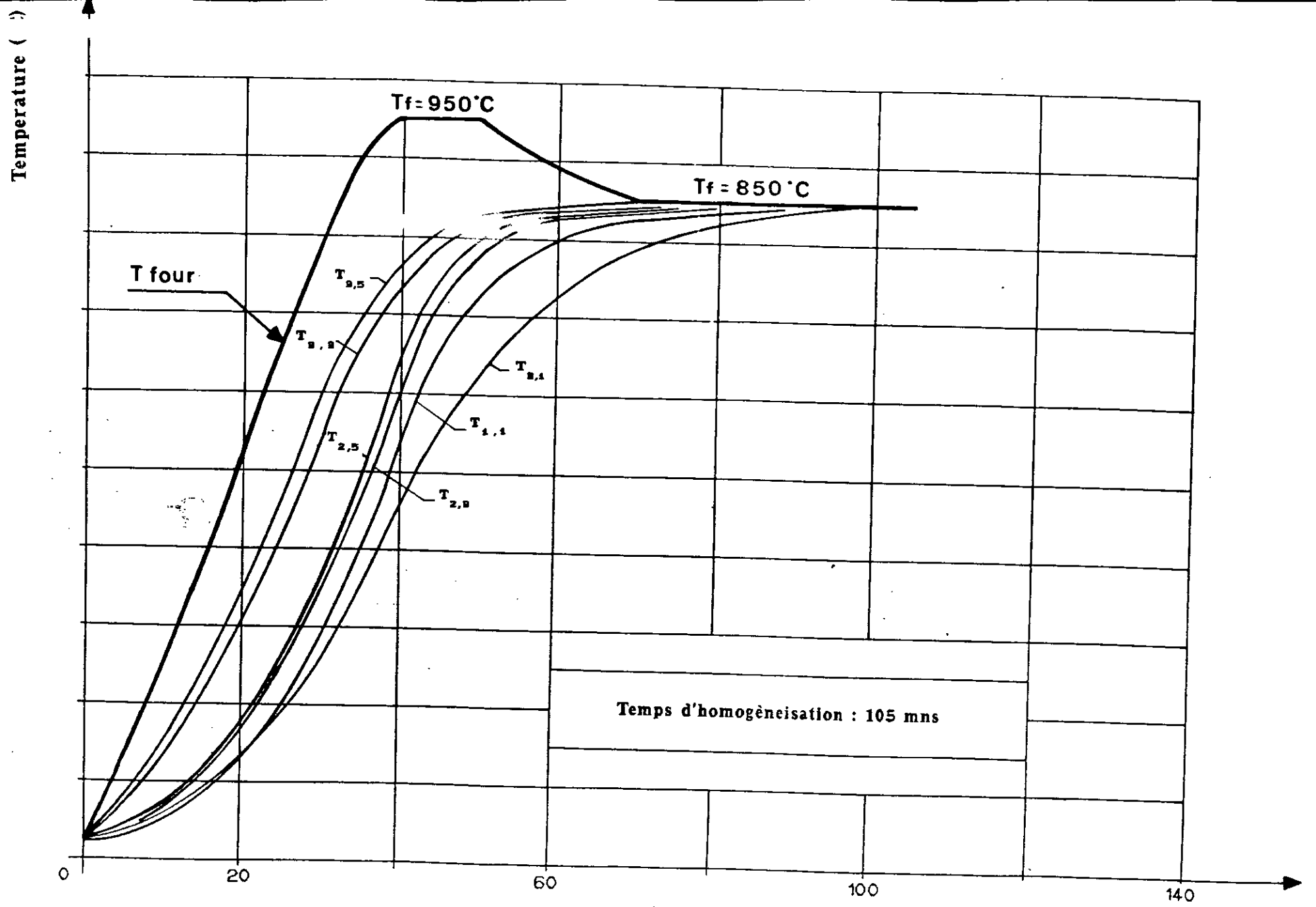


FIG V.3 : SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE  
TEMPERATURE DU CHAUFFAGE " C "

Temps ( mns)

CHAUFFAGE TYPE " D "

\*\*\*\*\* SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE LORS DU CHAUFFAGE TYPE D \*\*\*\*\*

iter...	temps..	Tfour..	T(1,1)	T(2,1)	T(2,2)	T(2,3)	T(2,4)	T(2,5)	T(3,1)	T(3,2)	T(3,3)	T(3,4)	T(3,5)
num	h.mn	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	0.00	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
1	0.05	100	28	36	31	31	31	31	41	52	52	52	52
2	0.10	200	45	55	58	58	58	58	60	77	77	77	77
3	0.15	300	77	94	98	98	98	98	102	130	130	130	130
4	0.20	400	126	142	157	157	157	157	150	190	190	190	190
5	0.25	500	189	206	228	228	228	228	215	275	275	275	275
6	0.30	600	267	281	316	317	317	317	290	368	368	368	368
7	0.35	700	360	372	417	417	417	417	382	483	483	483	483
8	0.40	800	467	475	535	535	535	535	485	608	608	608	608
9	0.45	850	583	576	655	655	655	655	578	690	691	691	691
10	0.50	850	680	665	733	733	733	733	662	746	746	746	746
11	0.55	850	743	727	776	776	776	776	722	792	792	792	792
12	1.00	850	782	766	806	806	806	806	763	810	810	810	810
13	1.05	850	807	795	820	820	820	820	790	828	828	828	828
14	1.10	850	821	808	832	832	832	832	805	833	833	833	833
15	1.15	850	831	824	837	837	837	837	822	840	840	840	840
16	1.20	850	837	831	842	842	842	842	830	842	842	842	842
17	1.25	850	841	838	844	844	844	844	836	846	846	846	846
18	1.30	850	844	842	846	846	846	846	843	846	846	846	846
19	1.35	850	846	847	847	847	847	847	846	848	848	848	848
20	1.40	850	848	847	849	849	849	849	848	849	849	849	849
21	1.45	850	849	850	849	849	849	849	850	850	850	850	850

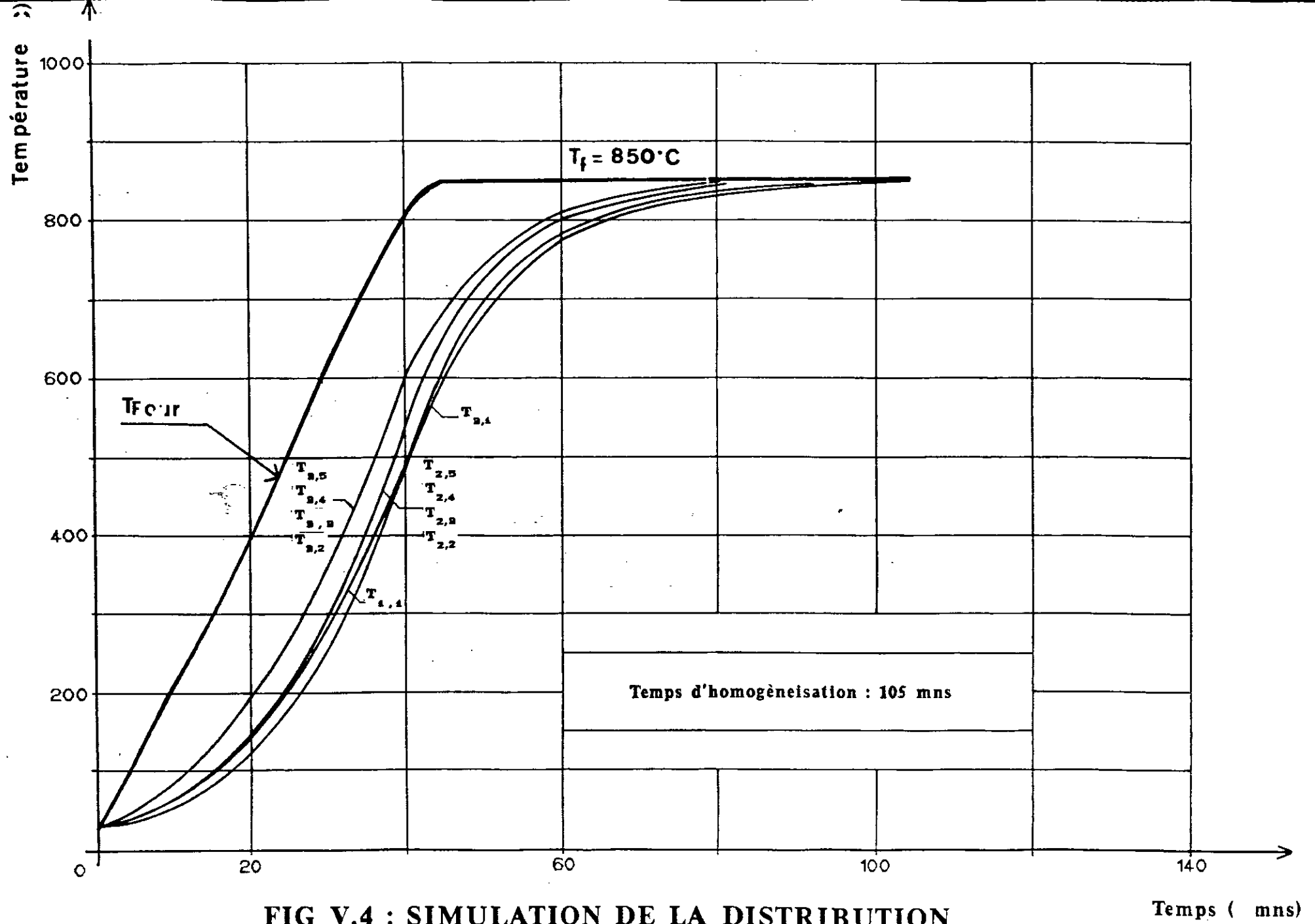


FIG V.4 : SIMULATION DE LA DISTRIBUTION

DE TEMPERATURE DU CHAUFFAGE " D "

Temps ( mns)



## V.2: Analyse des résultats numériques

La première constatation montre que les résultats numériques sont assez proches de ceux donnés par l'expérience. La simulation de la distribution de température lors de chaque type de chauffage est adéquate.

Les courbes de la simulation mathématique présentent un léger décalage (le maximum est d'une dizaine de °C) vers les températures plus faibles par rapport aux expérimentales; ceci est dû d'une part à la convexité des courbes  $T = f(t)$  lors du chauffage dans un four et d'autre part à la méthode d'approche, en l'occurrence les différences finies.

Une investigation du tableau de valeurs montre qu'à l'approche du régime stationnaire, les températures varient légèrement autour des valeurs expérimentales. Dans le cas du chauffage type "C", on assiste même à une sensible diminution des températures lorsque le four passe de 950 °C à 850 °C. Ce phénomène est observé expérimentalement.

La deuxième analyse des résultats et leurs comparaisons montre que dans le cas des chauffage type "A" et "C", le temps d'homogénéisation présente un retard d'environ 5 minutes; ceci est également dû aux erreurs de mesure et à la précision des méthodes numériques utilisées.

## ETUDE COMPARATIVE

De manière générale, les différents résultats numériques et expérimentaux obtenus sont assez concordants pour confirmer la validité du logiciel.

Force est de constater que la méthode des différences finies est d'un grand intérêt dans le domaine de la thermique; L'application de la méthode A.D.I pour l'établissement du système d'équations et de la méthode T.D.M.A pour sa résolution ont fait preuve d'un grand succès dans la modélisation mathématique du processus étudié.

Il est par ailleurs certain que les quelques différences et dispersions des résultats (température, temps d'homogénéisation) sont dues aux erreurs expérimentales de mesure (perforation des éprouvettes, thermocouples...), de lecture de la température (régulateur, enregistreur...) et à la complexité du modèle mathématique, mis à part les différentes méthodes utilisées pour la détermination des paramètres essentiels ( $h$ ,  $F$ ,  $w$ , ...) ainsi qu'à la précision des méthodes A.D.I et T.D.M.A.

Finalement, nous pouvons témoigner de l'efficacité du modèle mathématique et de la diversité de son application en présentant en annexe un tableau de la simulation du profil de température pour la même pièce, celle-ci est supposée enfournée lorsque le four est à la température du traitement.

## CONCLUSIONS GENERALES

Par cette étude, nous avons voulu mettre en valeur nos connaissances dans le domaine de la thermique appliquée aux fours. Ce travail qui a pour but l'optimisation du fonctionnement d'un four et l'amélioration de son rendement a été entrepris par la proposition de modes de chauffage que nous avons comparé entre eux et par rapport au chauffage par convection forcée dans un four électrique via la distribution de température dans une pièce cylindrique, du temps nécessaire à l'homogénéisation de la température dans toute l'épaisseur de celle-ci et de l'énergie consommée lors de chaque type de chauffage.

Le travail expérimental effectué a permis de montrer que lorsqu'on utilise une surchauffe à 950 °C pendant 10 minutes, on arrive à réduire d'un quart d'heure le temps requis à la réalisation du traitement thermique de Normalisation de l'acier XC 42. Le chauffage par palier à 650 °C permet plutôt une bonne homogénéité lors du régime transitoire. La convection forcée réalise quant à elle une meilleure homogénéité et un temps aussi réduit que celui de la surchauffe.

On a ainsi montré qu'il est possible de tirer toute la quintessence d'un four en réalisant des compromis et les résultats obtenus sont comparables à ceux d'un four plus sophistiqué.

Force est de constater qu'il est difficile dans la pratique de pouvoir éviter certaines erreurs expérimentales que l'on a tendance à considérer comme négligeables mais qui peuvent parfois conduire à des résultats non précis (erreurs de mesure, rapidité de lecture à un instant donné...).

La simulation mathématique qui a permis une meilleure connaissance du phénomène expérimental et qui servira de modèle pour l'analyse des procédés similaires a été menée à bien.

La confrontation des résultats mathématiques avec ceux de l'expérience en ayant recours à l'outil informatique a permis d'une part de conclure que malgré certaines hétérogénéités, l'étude expérimentale reflète assez bien la réalité, d'autre part le modèle mathématique simule convenablement le phénomène et le logiciel (paramétrable) élaboré pourrait être utilisé avec confiance, promptitude et à des coûts très faibles pour une éventuelle investigation et optimisation d'un processus analogue.

Il convient également de signaler qu'en filigrane de ces travaux, on a pu résoudre un "paradoxe" qui paraît simple pour certains mais très souvent moins compris par beaucoup: c'est la détermination rationnelle du temps d'homogénéisation, en effet moyennant les paramètres relatifs au traitement thermique, à la pièce et au four, le logiciel mis à disposition permet outre la connaissance de l'évolution de la température pendant le régime transitoire, de déterminer le temps d'homogénéisation à l'atteinte du régime stationnaire.

Finalement, nous tenons à préciser que le modèle mathématique élaboré est restreint aux géométries cylindriques horizontales; Notre souhait serait que cette tentative puisse connaître des perspectives, du moins en vue d'élargir encore plus son champ d'application par l'étude d'autres géométries.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] W.HEILIGENSTAEDT  
Thermique appliquée aux fours industriels. Tome I  
Notions fondamentales. Dunod 1971
- [2] J.P.HOLMAN  
Heat transfer. Mcgraw-Hill company 1972
- [3] M.ORFEUIL  
Electrothermie Industrielle. Dunod 1980
- [4] M.DWORZAK  
Les fours: Problèmes que peuvent rencontrer les  
constructeurs.  
Revue Trait.thermique, vol.210, P.18-19 1987
- [5] C.S.P.A.F.S  
Aciers de construction non alliés et alliés spéciaux  
pour traitement thermique. 1971
- [6] S.V.PATANKAR  
Numérical heat transfer and fluid flow  
Mcgraw-Hill company 1980
- [7] A.JORDAN, A.SZYBIAK, M.BENMOUNA  
Temperature distribution in cylindrical conductor  
with skin effect.  
Int.J.heat.mass transfer. vol.30 N°7 PP 1539-1541. 1987
- [8] A.ROOS  
Precis de métallographie appliquée. Dunod 1982
- [9] K.LAKHTINE  
Metallographie et traitement thermique des metaux  
Ed.Mir Moscou 1978
- [10] J.BARRALIS, G.MAEDER  
Précis de métallurgie  
Afnor - nathan Paris 1988

- [11] O.FARKAS, G.NAGY  
Tuzelestan  
Ed. Tankonyvkiadó Budapest 1985
- [12] J.L.MAZOYER  
Régulation des fours à résistances.  
Revue Trait.thermique. vol.210, P 9-17 1987
- [13] .NADJAFOV, .NIKOPORETS  
Fours metallurgiques  
O.P.U Alger 1983
- [14] H.FALTIN  
Technische wärmelehre  
Ed. Academie - Verlag. Berlin 1970
- [15] R.LOISON  
Chauffage industriel et utilisation des combustibles  
Techniques et documentation. 1957
- [16] G.LEMASSON, L.BLAIN  
Matériaux de construction mécanique et électrique.  
Dunod. 1976
- [17] B.GEBHART  
Heat transfer. Mcgraw-Hill company. 1971
- [18] W.M.ROHSENOW  
Handbook of heat transfer  
Macgraw. Hill Co. N.Y 1982
- [19] C.LEROUX  
Etat actuel des traitements thermiques, perspectives  
et developpement.  
Revue Trait.thermique vol 210, P 9-17 1987
- [20] H.S.CARSLAW, J.C.JAEGER  
Conduction of heat in solids.  
Oxford Univ Press. 1959
- [21] G.E.MYERS  
Analytical methods in conduction heat transfer.  
Mcgraw-Hill company 1971

- [22] J.CRANK, P.NICOLSON  
 A practical méthode for numérical évaluation of solutions of partial différential équations of the heat-conduction type.
- [23] G.LEPPERT  
 A stable numérical solution for transient heat flow.  
 J.Am.Soc.Naval.Engrs. vol.65, PP.741-752 1953
- [24] L.W.HUNTER, S.FAVIN  
 Steady state temperature distribution in a solid cylinder moving in the direction of its axis a cross-flow of hot gaz  
 J.Heat.Transfer. vol.99, PP.668-674 1977
- [25] A.DRAOUI, F.ALLARD (Dir.Thèse)  
 Etudes numériques des transferts de chaleur couplés rayonnement-conduction et rayonnement-convection dans un milieu semi transparent bidimensionnel.  
 Th.Doct.Génie civil I.N.S.A Lyon 1989
- [26] E.M.SPARROW, A.HAJI-SHEIKH  
 Transient and steady heat conduction in arbitrary bodies with arbitrary boundary and initial conditions.  
 J.Heat.Transfer. vol. , PP.103-108 1968
- [27] J.DOUGLAS, J.E.GUNN  
 A general formulation of alternating direction method, Part I, parabolic and hyperbolic problems.  
 Numerishe Mathematik. vol.6, PP.428-453 1964
- [28] G.O'BRIEN, M.HYMAN, S.KAPLAN  
 A study of the numerical solution of partial differential equations.  
 J.Math.Phy. vol.29, PP.223-251 1951
- [29] J.DOUGLAS, JR, H.H.RACHFORD, JR  
 On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables.  
 Trans.Amer.Math.Soc. vol.82, PP.421-439 1956

- [30] M.P.HEISLER  
 Temperature charts for induction and constant temperature heating.  
 Trans.ASME. vol.69, PP.227-236 1947
- [31] H.W.EMMONS  
 The numerical solution of heat conduction problems.  
 Trans.ASME. vol.65, PP.607-615 1943
- [32] M.LAPORTE  
 Algorithmes numériques; Analyse et mise en oeuvre.  
 Eyrolles. Paris 1974
- [33] V.S.ARPACI  
 Conduction heat transfer  
 Addison Wesley Pub. 1966
- [34] H.G.ELROD, JR  
 New finite difference technique for solution of the heat conduction equation, especially near surfaces with convective heat transfer.  
 Trans.ASME. vol.79, PP.1519-1526 1957
- [35] B.CARNAHAN, H.A.LUTHER, J.O.WILKS  
 Applied numerical methods.  
 John Weley & sons company N.Y. 1969
- [36] J.DOUGLAS, JR  
 Alternating direction methods for three space variables.  
 Numerische.Mathematik. vol.4, PP.41-63 1962
- [37]  
 Transient conduction in a plate with counteracting convection and thermal radiation at the boundaries.  
 Appl. Math. Modeling, 9, PP. 337-340 1985
- [38] H.Z.BARAKAT, J.A.CLARK  
 On the solution of the diffusion equations by numerical methods.  
 J.Heat Transfer. vol.88, PP.421-427 1966



- [39] O.J.EVANS, C.R.GANE  
A.D.I methods for the solution of transient heat conduction problems in R- $\theta$  geometry  
Int.J.Numer.Methods.Ing. vol.12, PP.1799-1807 1978
- [40] N.V.MARCHENKO, Ya.I.SHIPEL'MAN  
Transient radiation-conduction heat transfer in a finite cylinder filled with an absorbing radiating medium.  
High.Temp. vol.21. PP.553-558 1983
- [41] G.RIBAUD  
Mesures des températures T1 et T2  
Dunod. Paris 1958
- [42] Mesures thermiques
- [43] M.SAKO, T.CHIBA, J.M.S.GARZA  
Numerical solution of transient natural convective heat transfer from a horizontal cylinder.  
Heat.Transfer.Jap.Res. vol.11, PP.27-44 1982
- [44] K.A.WERKLEY, J.G.GILLIGAN  
The temperature distribution of a sphere placed in a directed uniform heat flow.  
J.Heat.Transfer. vol.103, PP.399-401 1981
- [45] T.H.KUEHN, R.J.GOLDSTEIN  
Numerical solution to the Navier-Stokes equations for laminar natural convection about horizontal isothermal circular cylinders.  
Int.J.Heat.Mass.Transfer. vol.23, PP.971-979 1980
- [46] H.NAKAMURA, V.ASAKO  
Laminar free convection from a horizontal cylinder with a uniform cross section of arbitrary shape.  
Bull. J.S.M.E Vol.21, PP. 471-478 1978
- [47] Techniques de l'ingenieur  
Traitements thermiques

- [48] T.FUJI, M.FUJI, T.MATSUNAGA  
 A numerical analysis of laminar free convection around  
 an isothermal horizontal circular cylinder.  
 Num.Heat.Transfer. vol.2, PP.329-344 1979
- [49] A.V.LUIKOV  
 Methods of solving the nonlinear equations of unsteady-  
 state heat conduction.  
 Heat.Transfer.Soviet.Res. vol.3, PP.1-51 1971
- [50] R.B.HWANG  
 The application of the A.D.I.numerical scheme in  
 subsurface transient flow.  
 Proc.Heat.Transfer.fuid.Mecha.Calif.28-29 May.PP.49-67 1987
- [51] D.ABLITZER  
 Modelisation mathematique des procedés  
 E.N.S.M.I.M.Nancy
- [52] J.K.BRIMACOMBE  
 Numerical solution of differential equations.  
 U.S.Steel.Corp. 1977
- [53] D.M.HIMMELBLAU, K.B.BISCHOFF  
 Process analysis and simulation-deterministic systems.  
 John Wiley & sons Inc.N.Y. 1968
- [54] A.B DE VRIENDT  
 La transmission de la chaleur T1 et T2  
 Gaëtau.Morin.Ed. 1982
- [55] D.W.PEACEMAN, H.H.RACHFORD  
 The numerical solution of parabolic and elliptic  
 differential equations.  
 J.Soc.Indust.Appl.Math. vol.3, PP.28-41 1955
- [56] D.YOUNG  
 Iterative methods for solving partial difference  
 equations of elliptic type. 1954

- [57] S.S.SADHAL  
 Unsteady heat flow between solids with partially  
 contacting interface.  
 J.Heat.Transfer. vol.103, PP.32-35 1981
- [58] P.CLAVIN  
 Modélisation des phénomènes de combustion  
 Eyrolles Paris 1985
- [59] F.P.INCROPERA, D.P.DEWIT  
 Fundamentals of heat and mass transfer  
 J.Wiley & Sons Co. N.Y 1985
- [60] R.P.BENEDICT  
 Fundamentals of temperature, pressure and flow  
 measurements  
 J.Wiley & Sons Co. N.Y 1984
- [61] F.KREITH  
 Principles of heat transfer  
 Int. Textbook. Co. 1962
- [62] A.J.CHAPMAN  
 Heat transfer  
 Macmillan. Pub Co 1974
- [63] C.DELANNOY  
 Apprendre à programmer en basic.  
 Eyrolles- Paris 1984
- [64] B.VANRYB, R.PROLITS  
 Basic et GW Basic  
 Eyrolles- Paris 1985
- [65] M.GACI, D.MAILLE  
 Le basic et ses applications  
 Ed. Berti Alger 1989
- [66] Documents IRSID, afnor, ...

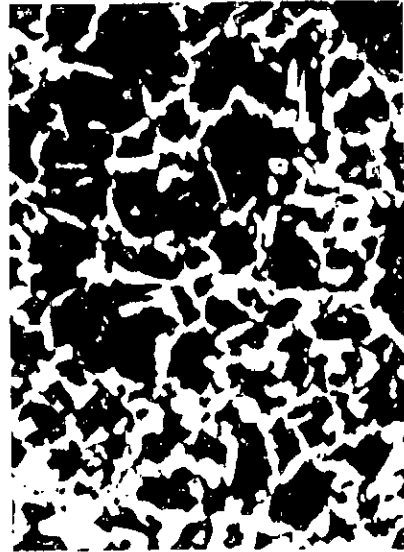
## ANNEXE I

Représentation de la structure métallographique et de la dureté HB d'un échantillon prélevé sur l'éprouvette d'acier XC 42 n'ayant pas subi le traitement thermique de normalisation

Echantillon non traité



Au centre



A la périphérie

Structures métallographiques de l'acier XC 42 non traité

Points de mesure:	Diamètres des empreintes:		Diamètre moyen: (mm)	Dureté BRINELL (HB):
	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)		
a	2,21	2,22	2,215	184
b	2,24	2,25	2,245	179
c	2,25	2,25	2,250	178
d	2,25	2,23	2,240	180
e	2,22	2,23	2,225	183
f	2,25	2,24	2,245	179
g	2,22	2,21	2,215	184
Dureté HB moyenne de l'éprouvette:				181

Tableau de dureté HB d'un échantillon XC 42 non traité.

## ANNEXE II

Resultats numeriques determinés par application des quatre types de chauffage, le four étant allumé.

On observe un décalage regulier des résultats et par conséquent des courbes correspondantes par rapport à celles où le four est initialement à 25°C, ce qui valide dans ce cas aussi le modèle mathématique élaboré.

\*\*\*\*\* SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE LORS DU CHAUFFAGE TYPE A \*\*\*\*\*

iter...	temps..	Tfour..	T(1,1)	T(2,1)	T(2,2)	T(2,3)	T(2,4)	T(2,5)	T(3,1)	T(3,2)	T(3,3)	T(3,4)	T(3,5)
num	h.mn	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	0.00	850	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
1	0.05	850	366	372	428	437	446	454	400	496	511	526	541
2	0.10	850	495	505	559	567	576	585	500	554	563	572	580
3	0.15	850	595	592	632	637	642	647	600	673	683	692	701
4	0.20	850	672	689	707	713	720	726	700	702	708	714	720
5	0.25	850	735	781	749	751	754	756	800	770	776	782	787
6	0.30	850	783	830	796	800	804	807	850	791	793	796	798
7	0.35	850	817	847	820	820	821	821	850	829	831	833	836
8	0.40	850	833	842	838	840	841	843	850	834	834	835	835
9	0.45	850	842	853	842	842	841	841	850	847	847	848	849
10	0.50	850	846	845	848	849	850	850	850	845	845	845	845
11	0.55	850	848	853	848	847	847	846	850	850	850	851	851
12	1.00	850	849	846	850	851	851	852	850	848	848	848	848
13	1.05	850	850	853	849	849	848	848	850	850	851	851	851
14	1.10	850	850	847	850	851	851	851	850	849	849	849	849
15	1.15	850	850	852	850	849	849	849	850	850	851	851	851
16	1.20	850	850	848	850	851	851	851	850	850	849	849	849
17	1.25	850	850	852	850	850	849	849	850	850	850	851	851
18	1.30	850	850	849	850	850	851	851	850	850	850	850	849
19	1.35	850	850	851	850	850	849	849	850	850	850	850	850
20	1.40	850	850	849	850	850	850	851	850	850	850	850	850
21	1.45	850	850	851	850	850	850	849	850	850	850	850	850
22	1.50	850	850	849	850	850	850	850	850	850	850	850	850
23	1.55	850	850	851	850	850	850	850	850	850	850	850	850

\*\*\*\*\* SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE LORS DU CHAUFFAGE TYPE B \*\*\*\*\*

iter...	temps..	Tfour..	T(1,1)	T(2,1)	T(2,2)	T(2,3)	T(2,4)	T(2,5)	T(3,1)	T(3,2)	T(3,3)	T(3,4)	T(3,5)
num	h.mn	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	0.00	650	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
1	0.05	750	251	272	301	304	307	310	300	397	409	422	434
2	0.10	850	376	394	447	456	464	472	400	469	483	496	510
3	0.15	850	501	496	555	563	571	579	500	588	597	606	615
4	0.20	850	598	596	643	649	654	659	600	655	664	673	681
5	0.25	850	674	690	701	707	713	719	700	720	726	733	738
6	0.30	850	735	779	755	759	761	764	800	759	765	770	775
7	0.35	850	784	835	792	795	798	801	850	800	803	806	808
8	0.40	850	816	842	824	825	826	826	850	823	825	827	829
9	0.45	850	834	847	835	837	838	839	850	839	839	840	841
10	0.50	850	842	848	845	845	845	844	850	843	844	844	845
11	0.55	850	846	850	846	847	847	847	850	848	848	848	848
12	1.00	850	848	849	849	849	849	849	850	848	848	849	849
13	1.05	850	849	850	849	849	849	850	850	850	850	850	850
14	1.10	850	850	849	850	850	850	850	850	849	849	850	850
15	1.15	850	850	850	849	850	850	850	850	850	850	850	850
16	1.20	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
17	1.25	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
18	1.30	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
19	1.35	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
20	1.40	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
21	1.45	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
22	1.50	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
23	1.55	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
24	2.00	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
25	2.05	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
26	2.10	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850



\*\*\*\*\* SIMULATION DE LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE LORS DU CHAUFFAGE TYPE C \*\*\*\*\*

iter...	temps..	Tfour..	T(1,1)	T(2,1)	T(2,2)	T(2,3)	T(2,4)	T(2,5)	T(3,1)	T(3,2)	T(3,3)	T(3,4)	T(3,5)
num	h.mn	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	0.00	950	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
1	0.05	950	475	471	541	555	568	581	500	620	643	666	688
2	0.10	950	620	612	689	702	716	728	600	684	697	710	721
3	0.15	925	723	700	760	767	773	778	700	789	799	808	816
4	0.20	900	787	793	815	821	827	832	800	804	809	812	815
5	0.25	875	829	847	835	837	838	838	850	843	845	847	848
6	0.30	850	846	847	851	853	854	856	850	838	837	836	834
7	0.35	850	849	853	846	844	843	842	850	856	856	857	859
8	0.40	850	849	845	851	853	854	856	850	844	844	843	842
9	0.45	850	850	855	848	847	846	845	850	853	854	855	855
10	0.50	850	850	845	851	852	853	854	850	847	847	846	846
11	0.55	850	850	854	849	848	847	846	850	852	852	853	853
12	1.00	850	850	846	851	851	852	853	850	848	848	848	847
13	1.05	850	850	854	850	849	848	847	850	851	851	852	852
14	1.10	850	850	847	850	851	852	852	850	849	849	849	848
15	1.15	850	850	853	850	849	849	848	850	851	851	851	851
16	1.20	850	850	848	850	851	851	852	850	850	849	849	849
17	1.25	850	850	852	850	849	849	849	850	850	851	851	851
18	1.30	850	850	848	850	850	851	851	850	850	850	849	849
19	1.35	850	850	852	850	850	849	849	850	850	850	850	851
20	1.40	850	850	849	850	850	851	851	850	850	850	850	849

