

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

5/87

وزارة التعليم و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

1EX

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT : MINES ET METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

OPTIMISATION DE LA GAMME
DU TRAITEMENT THERMIQUE
DU CORPS SPIRALE D'UNE
POMPE A EAU

Proposé Par :

C.V.P

Etudié par :

M Mendaci

Dirigé par :

S Salhi

PROMOTION : Janvier 87

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
عَظِيمًا لَكَ يَا كَرِيمًا
وَالْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

مَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمِ

~ Dedicaces ~

A mes parents

A mes frères et sœurs

A tous ceux qui me sont Chers

Je dedie ce projet de fin
d'études.

MENAGI MOHAMED

- Remerciements -

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Mes remerciements sincères à mon Promoteur Monsieur SALHI, et à Monsieur MAYSTROUK pour leurs aides tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à leurs exprimer toute ma gratitude.

Il m'est agréable aussi d'exprimer ici ma reconnaissance aux Professeurs qui ont contribué à ma formation.

Je tiens également à remercier tout le Personnel du Laboratoire de la Fonderie du C.P.V de Berrouaghia et en particulier MADANI Mohamed et LAKHAL Mohamed.

Enfin sans oublier tout ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet et en particulier messieurs Mouafki Reda, Hassoun Ali, Hamidi Moussa et Bentaha DJamel, pour la mise en forme de cette thèse

Mendaci Mohamed

S O M M A I R E

INTRODUCTION

CHAPITRE I. PRESENTATION DE LA PIECE

- I.1. DESSIN TECHNIQUE
- I.2. FABRICATION
- I.3. SOLLICITATION DE LA PIECE

CHAPITRE II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES FONTES GRISES LAMELLAIRES

- II.1. ELABORATION
- II.2. COMPOSITION CHIMIQUE
- II.3. CARACTERISTIQUE MECANIQUE
- II.4. MECANISME DE CRISTALLISATION DU GRAPHITE

CHAPITRE III

- III.1. DEFINITION
- III.2. BUT
- III.3. CYCLE THERMIQUE
- III.4. MILIEU DE CHAUFFAGE
- III.5. RECUIT
- III.6. RECUIT D'ADOUCCISSEMENT UTILISE A LA FONDERIE
DE CPV DE BERROUAGHIA
- III.7. CHOIX D'UNE NOUVELLE GAMME DE TRAITEMENT THERMIQUE

CHAPITRE IV. ETUDES ET RESULTATS EXPERIMENTALES

- IV.1. ECHANTILLONS ET EPROUVETTES
- IV.2. ESSAIS MECANQUES
- IV.3. MICRODURETE (DURETE VICKERS)
- IV.4. MICROGRAPHIE

CHAPITRE V : INTERPRETATION DES RESULTATS

- V.1. PROPRIETE DE TRACTION
- V.2. TRACTION
- V.3: STRUCTURE

- CONCLUSION



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



Cette présente étude réalisée au complexe pompes et vannes de Berrouaghia a pour objectif une optimisation de la production des pompes à eau 'Mitidja' ceci par réduction du cycle de traitement thermique en cours qui est de vingt trois (23) heures du corps spiral de la pompe.

Les caractéristiques mécaniques de notre pièce fabriqué en Ft 20, les calculs théoriques concernant la durée de chauffage et les expériences effectuées nous permettent d'envisager un cycle de traitement thermique de durée nettement réduite, qui pourrait être intégrer dans la fonderie de Berrouaghia.

Cette étude se présente comme suit:

Le premier chapitre consiste à la présentation de la pièce (dessin, fabrication, sollicitation).

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique des fontes grises lamellaires.

Le troisième chapitre représente l'aspect théorique du traitement thermique et fixe notre choix d'une nouvelle gamme de traitement pour notre cas.

Dans le IV et le V chapitre on trouvera l'étude expérimentale, les résultats et notre interprétation de ceux-ci.

C H A P I T R E I

PRESENTATION DE LA PIECE

I.1. DESSIN TECHNIQUE (Voir page N° 5)

I.1.1. Rôle de la pièce

Le corps spiral sert à capter l'eau sortant de la roue et à partiellement transformer son inergie cinétique en inergie de pression.

I.2. FABRICATION : C'est une pièce moulée coulée en sable avec de la fonte Ft 20

- Sable de fonderie: Ils utilisent 2 sortes de sable:
 - . Sable de moulage
 - . Sable de noyautage

Le sable de moulage est composé de :

- 93% de vieux sable
- 06% de sable neuf
- 0,7% de Bentonite
- 0,3% de poussière de charbon

Le sable de noyautage : Il y a 2 procédés

- | | | |
|--|---|------------------------------|
| - Procédé au CO ₂ pour le noyau central |) | 95-96% de sable siliceux |
| |) | 2,4 - 4% de verre soluble |
| |) | 1% de sciure de bois |
| | | |
| - Procédé Cold Box pour le noyau de l'extérieur) |) | 96,8-97,9% de sable siliceux |
| |) | 1,5 - 2% de |

I.2.2.1. Décochage: Après la coulée de la pièce et refroidissement lent dans la moule, on effectue cette opération, le moule contenant la pièce passe dans une machine qui à l'aide de secousse permet de séparer la pièce du moule.

I.2.2.2. Débarurage: s'effectue à l'aide d'une meule et permet d'enlever les masselotes et les jets de coulée.

I.2.2.3. Ebarbage: s'effectue à l'aide d'une grenailleuse.

I.2.2.4. Traitement thermique

Les pièces en FT 20 subissent un traitement d'adoucissement et d'homogénéisation c'est à dire un recuit d'adoucissement.

Recuit d'adoucissement: c'est un traitement qui a pour but d'éliminer les tensions internes et de dissoudre la cémentite pour obtenir une structure ferritique ductile, ainsi que les pièces obtenues, ont une très bonne usinabilité ce traitement s'effectue de la façon suivante:

a.- Enfournement à 300°C

Il consiste à chauffer les pièces à 900°C avec une vitesse de 150°/h et ceux ci pour dissoudre la cémentite et obtenir une structure Austénitique.

b.- Un maintien de 3 heures pour permettre à la cémentite de dissoudre, et le carbone de diffuser dans l'austenite.

I.2.2.1. Décochage: Après la coulée de la pièce et refroidissement lent dans la moule, on effectue cette opération, le moule contenant la pièce passe dans une machine qui à l'aide de secousse permet de séparer la pièce du moule.

I.2.2.2. Débarurage: s'effectue à l'aide d'une meule et permet d'enlever les masselotes et les jets de coulée.

I.2.2.3. Ebarbage: s'effectue à l'aide d'une grenailleuse.

I.2.2.4. Traitement thermique

Les pièces en FT 20 subissent un traitement d'adoucissement et d'homogénéisation c'est à dire un recuit d'adoucissement.

Recuit d'adoucissement: c'est un traitement qui a pour but d'éliminer les tensions internes et de dissoudre la cémentite pour obtenir une structure ferritique ductile, ainsi que les pièces obtenues, ont une très bonne usinabilité ce traitement s'effectue de la façon suivante:

a.- Enfournement à 300°C

Il consiste à chauffer les pièces à 900°C avec une vitesse de 150°/h et ceux ci pour dissoudre la cémentite et obtenir une structure Austénitique.

b.- Un maintien de 3 heures pour permettre à la cémentite de dissoudre, et le carbone de diffuser dans l'austenite.

c.- Puis un refroidissement lent en 2 étapes

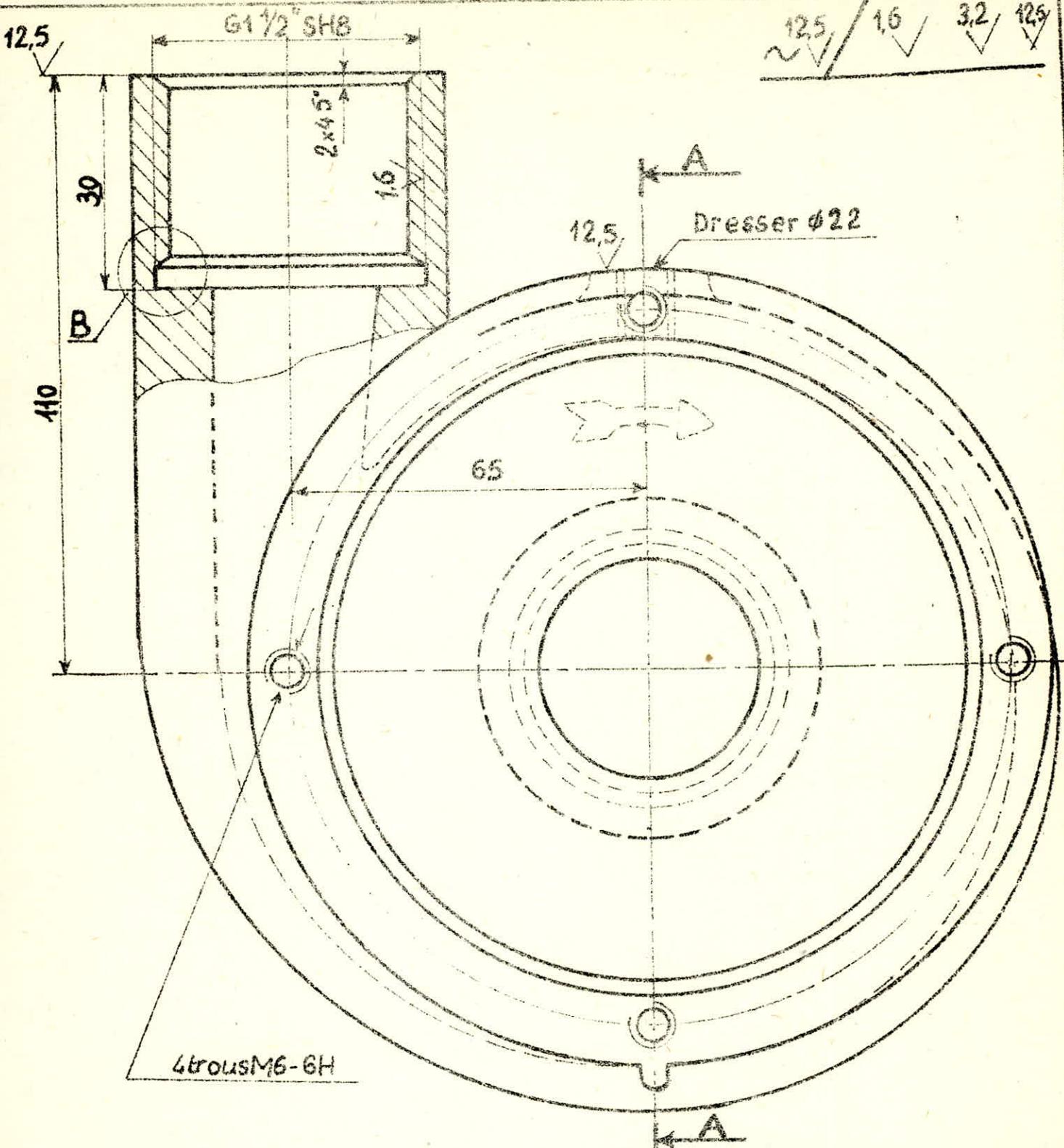
- La première étape entre 900° et 600° avec une vitesse de 30°/h
- La deuxième étape entre 600° et 300° avec une vitesse de 50°/h
- Le défournement à 300°C et le refroidissement continu à l'air libre

I.2.2.5. Peinture: Les pièces sont peintées par une peinture anticorrosive vu les conditions de travail (influence du milieu agressif).

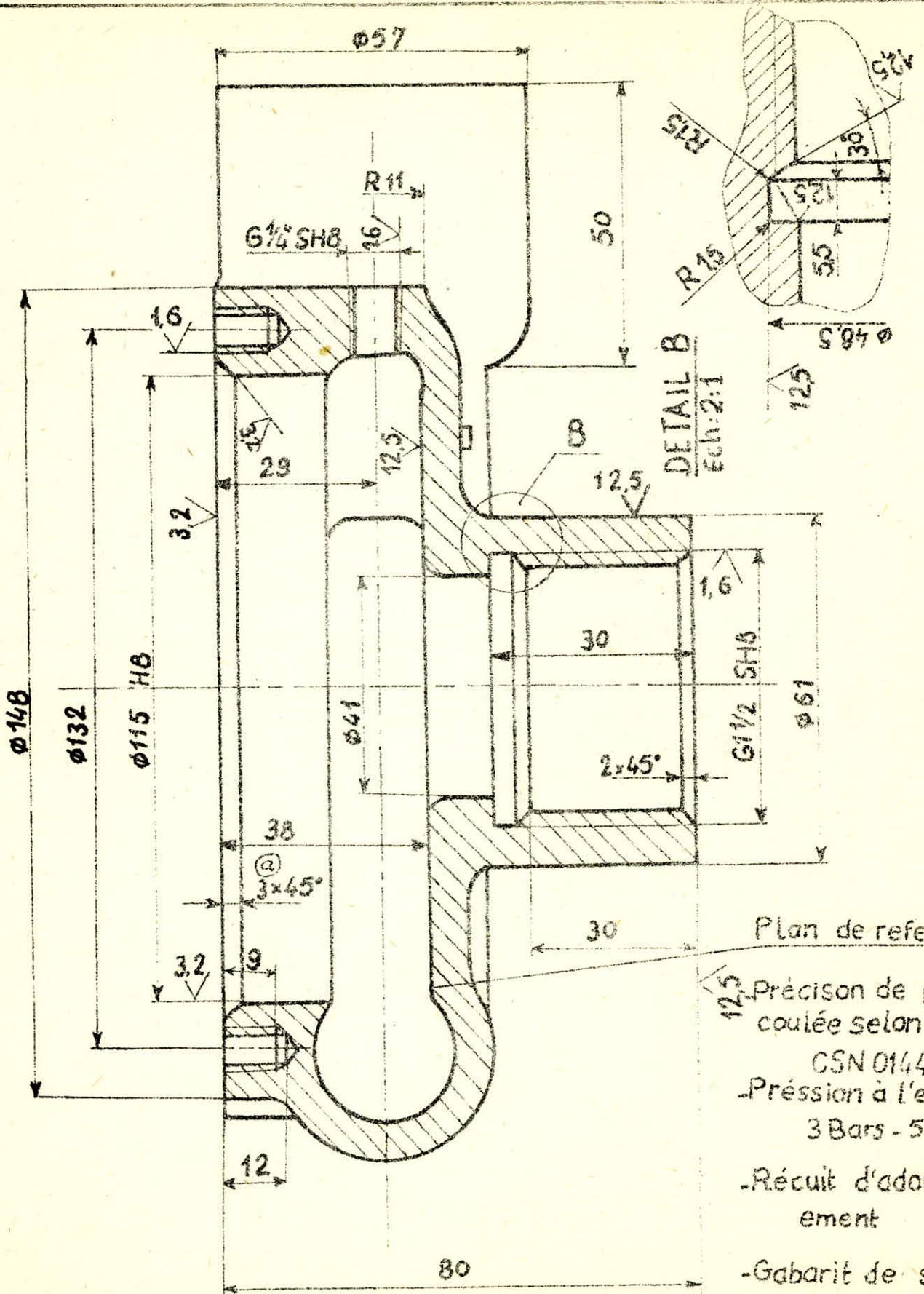
I.3. SOLLICITATION DES PIÈCES

La pièce N° 002 est un corp spiral de pompe à l'eau (pompe type Mitidja 32, son débit Q est de (8 - 10) m³/h et H_{max} = (12 - 14 m).

La pièce est exposée a l'atmosphère par sa partie interne, elle est soumise à une pression de 4 bar. Elle doit assurer une bonne étanchéité et une bonne résistance à la corrosion (pompe travaillant dans des milieux agressifs: l'eau de mer, l'eau potable, puits de pétrole ...).



MITIDJA 32 avec Moteur électrique	Dessin - N° 000.00.0002.302.3	pos: 3	Poids brut 4	Poids-final 3,2
	Ecart pour mesures Sans tolérances	N° de pièce brute ou produit semi-fin Matière GGL 20 Designation CORPS SPIRAL	Echelle 1:1 (2:1)	✓



Plan de referenc

12.5 Précision de pièce
 coulée selon

CSN 014470.4

-Préssion à l'essai

3 Bars - 5mm

-Récuit d'adoucis

ement

-Gabarit de spiral

000.00.0019 001.

CHAPITRE II

ETUDE DES FONTES GRISES LAMELLAIRES

II.1. NOTION SUR LES FONTES

Les alliages de fer dont la teneur en carbone est supérieur à 2,14% s'appellent fontes.

Dans une fonte, le carbone prend la forme de cementite ou de graphite, ou se trouvent simultanément sous ces deux formes une fonte dont tout le carbone est sous forme de cementite est dite fonte blanche (la cementite donne à la cassure une couleur blanche). Si le carbone est sous la forme de graphite, la fonte est dite grise (le graphite donne à la cassure une couleur grise). D'après la forme de graphite et les conditions de sa formation, les fontes grises sont classées de la façon suivante:

- fonte grise lamellaire
- fonte grise à graphite sphéroïdal
- fonte maleable

II.2. FORTE GRISE LAMELLAIRE

Les fontes grises sont des fontes industrielles, au fond ce sont des alliages Fe-C-Si qui contiennent comme impuretés inévitables Mn, P et le So.

Le graphite se trouve sous forme lamellaire, ce qui est une caractéristique particulière de ces fontes, ce qui détermine de nombreuses de leurs propriétés, les plus utilisés ce sont les

fontes hypoeutectiques titrant:

- 2,4 - 3,8 % C
- 1,2 - 3,5 % Si
- 0,25 % P
- 0,9% Mn

II.2.1. Elaboration

Les fontes grises peuvent être élaborées dans divers appareils de fusion, les utilisés sont le cubilot et les fours électriques (dans la CPV de Berrouaghia c'est le four à induction qui est utilisé).

Le charge métallique est composée de :

- 45% de retour de production
- 35% Hematite (3,9%C; 1,96%Si; 0,68% Mn; 0,04 P; 0,024 % S)
- 10% fonte neuve provenant de la SNS
- 10% de ferrailles

II.2.2. Four à induction

Le principe est de transformer l'énergie électrique dans une bobine d'induction en énergie électromagnétique où les courants induits se transforment en chaleur par effet joule.

- Capacité : 12 t
- Puissance: 2650 KW
- \varnothing du creuset (intérieur): 1,11 m
- Hauteur: 1,78 m

II.3. COMPOSITION CHIMIQUE

Les propriétés d'utilisation des fontes grises sont intimement liées à la structure de ces fontes, laquelle dépend de deux facteurs principaux:

- Analyse chimique
- Vitesse de refroidissement qui dépend de l'épaisseur de la pièce à couler et de la nature du moule dans lequel la pièce sera coulée.

En fonderie de fonte grise, l'épaisseur moyenne de la pièce étant connue, et la nature du moule étant fixée, donc c'est son analyse chimique qui conditionne sa structure.

II.3.1. Le Carbone

Dans les fontes grises lamellaires, la teneur en carbone varie couramment de 2,8 à 3,8%, à la température ambiante, le carbone n'entre qu'en très faible quantité en solution dans le fer α (ferrite).

Il se trouve surtout à l'état combiné sous forme de carbure (Fe 3C) ou libre sous forme de graphite.

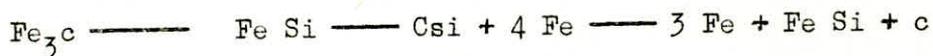
Le carbone joue le rôle des entailles affaiblissant la matrice métallique de la structure. La teneur en carbone totale d'une fonte grise lamellaire doit être inférieure à 3,8% pour que les caractéristiques mécaniques recherchées soient plus élevées, par contre des propriétés de moulage

(Coulabilité) élevés ne peut être assurées que par une teneur en carbone supérieur à 2,4%, ainsi les difficultés d'obtention des pièces denses sans défauts (rotassures, criques) apparaissent au fur et à mesure que la teneur de la fonte en carbone total ^{est} basse, c'est pourquoi industriellement il est guère possible d'envisager une teneur en carbone inférieur à 2,8%. Les meilleurs résultats sont obtenus pour la composition eutectique.

II.3.2. Silicium

Le plus souvent la teneur de silicium varie de 1,2 à 3,5% dans les fontes grises joue un rôle très important car il influe fortement sur la structure et par suite sur les propriétés.

C'est un élément qui favorise de plus la précipitation du carbone sous forme graphitique selon la réaction



La présence modifie considérablement le diagramme d'équilibre Fe - c, et plus précisément il modifie le point d'entectique qui se déplace à gauche pour un alliage sans silicium le point entectique correspond à 4,3% c, alors qu'un alliage à 2% de Si le point entectique se trouve à 3,7 c (1% de si diminue de 0,3% la teneur de l'entectique en c). Ce qui entraîne l'augmentation de la quantité de graphite dans la fonte. La présence de graphite en quantité importante a faiblit les propriétés mécaniques de la fonte donc si la teneur en carbone augmente il est nécessaire de diminuer la teneur en silicium (teneur en carbone totale et la

teneur en silicium doivent varier en sens inverse).

Le silicium étant un élément graphitisant agit sur la structure comme le ferait une diminution de la vitesse de refroidissement de la pièce dont la teneur en silicium et l'épaisseur moyenne de la pièce doivent varier en sens inverse pour conserver les propriétés mécanique semblables. Par ailleurs lorsque la teneur en silicium augmente la température de début de solidification augmente par suite l'intervalle de solidification est moins grand (graphe).

- Température de fusion diminue (économie de chaleur).
- Les pièces présentent moins de défauts (hétérogénéité de structure, rétassures), enfin le silicium augmente la coulabilité de la fonte.

II.3.3. Le Manganèse

Habituellement les teneurs en Mn rencontrés dans les fontes grises ordinaire varient de 0,45 à 0,90%, le manganèse a peu d'influence sur la structure de la fonte, il affine quelque peu la perlite, ce qui entraîne l'élévation de la résistance à la traction surtout pour des teneurs les plus élevés de l'intervalle indiqué.

Le manganèse ne gêne, ni favorise la graphitisation, son rôle essentiel est de neutraliser l'effet néfaste du soufre, sur les propriétés mécaniques par formation de sulfure de manganèse MnS .

La teneur minimum en manganèse doit répondre à la formule pratique $Mn \% = 1,72 + S \% + 0,3$ de façon que le rapport des teneurs en manganèse et soufre soit supérieur à celui de leur poids atomique et pour que tout le soufre soit combiné au manganèse sous forme de sulfure de manganèse MnS qui est moins dangereux que le sulfure de fer FeS .

II.3.4. Le Soufre

Le soufre appartient aux éléments qui ralentissent sensiblement la graphitisation, il provoque le grossissement des lamelles de graphite, c'est une impureté nocive qui altère les propriétés mécaniques et la coulabilité de la fonte, c'est pourquoi sa teneur doit être ramené à $0,1 \div 0,12 \%$ (teneur en soufre ne doit pas dépasser $0,15 \%$).

II.3.5. Le Phosphore

Le plus souvent la teneur de la fonte grise en phosphore ne dépasse pas $0,2 \%$, mais parfois on admet même $0,4$ à $0,5\%$, il n'influe pas sur la graphitisation, un taux élevé dans la structure entraîne la formation des inclusions solides dures d'un entectique phosphoreux binaire qui varie considérablement suivant la vitesse de refroidissement lorsque celle-ci est grande, l'entectique est réparti en réseau continu qui délimite complètement les cellules entectiques, ce qui contribue à diminuer sensiblement la résistance à la traction.

II.3.6. Tableau d'analyse chimique de la fonte lamellaire

FGL 20 = FT 20 utilisé dans la fabrication des pièces
(à la CPV de Berrouaghia)

	C %	Si %	Mn %	S%	P%
Analyse selon le cahier de charge (CPV Berrouaghia)	3,30-3,60	2,2-1,6	0,5-0,75	0,12	0,45
Analyse faite sur coupeaux d'une pièce réelle	3,43	1,90	0,69	0,037	0,1

II.4. STRUCTURE

Les fontes grises sont constitués d'une matrice ou se trouvent mêlés des particules de graphite en forme de lamelles des cristaux d'entectique phosphoreux et d'autres inclusions secondaires dont le rôle est négligeable.

A l'état brute de coulée la matrice est composée de ferrite, perlite ou d'un mélange phosphoreux lorsque celui-ci dépasse 0,1 % environ, elle peut contenir des carbures (cémentite) lorsque la vitesse de refroidissement est importante.

II.4.1. Matrice ferritique

Elle est plus dure que celle des aciers en raison de sa teneur en silicium, plus élevée, la tendance à sa formation croît avec la quantité de carbone équivalent.

II.4.2. Matrice perlitique

Sa dureté croît avec la finesse de ses lamelles et qui varie entre (200 - 300) HB.

La quantité de perlite et la finesse de ses lamelles dépendent de la composition chimique de la fonte (surtout de la quantité Mn % Mn).

II.4.3. Cémentite

La caractéristique essentielle de la cémentite est sa dureté très élevée (de l'ordre de 700 - 800 HB).

II.4.4. Graphite

Dans les fontes grises le graphite est plus ou moins ramifié, plus ou moins fin, plus ou moins abondant. Dans l'espace il se présente comme des feuilles au profil plus ou moins tourmenté. Au microscope, il apparaît sous forme de bâtonnets aux extrémités éfilées, leur longueur peut atteindre le millimètre.

II.4.5. Influence du c et du Si sur la structure

(voir page N° 50 fig. 1).

II.4.1. Matrice ferritique

Elle est plus dure que celle des aciers en raison de sa teneur en silicium, plus élevée, la tendance à sa formation croît avec la quantité de carbone équivalent.

II.4.2. Matrice perlitique

Sa dureté croît avec la finesse de ses lamelles et qui varie entre (200 - 300) HB.

La quantité de perlite et la finesse de ses lamelles dépendent de la composition chimique de la fonte (surtout de la quantité Mn % Mn).

II.4.3. Cémentite

La caractéristique essentielle de la cémentite est sa dureté très élevée (de l'ordre de 700 - 800 HB).

II.4.4. Graphite

Dans les fontes grises le graphite est plus ou moins ramifié, plus ou moins fin, plus ou moins abondant. Dans l'espace il se présente comme des feuilles au profil plus ou moins tourmenté. Au microscope, il apparaît sous forme de bâtonnets aux extrémités éfilées, leur longueur peut atteindre le millimètre.

II.4.5. Influence du c et du Si sur la structure

(voir page N° 20 fig. 1).

II.4.6. Influence du (C + Si) % en fonction de l'épaisseur sur la structure (voir page 20 fig. 2).

II.5. CARACTERISTIQUES MECANQUES DES FONTES LAMELLAIRE

Les caractéristiques mécaniques des fontes grises dépendent de 3 facteurs :

1°- Le graphite: il joue le rôle des entailles affaiblissant la matrice métallique de la structure dans ce cas les propriétés mécaniques dépendent de la quantité de la grandeur et de la distribution des inclusions de graphite.

La résistance de la fonte et d'autant plus grandes que la quantité des inclusions graphiques est plus petite qu'elles sont plus fines et plus isolés. Les lamelles de graphite diminuent brusquement la résistance à la charge de rupture et particulièrement la plasticité de la fonte.

2°- Structure de la matrice: quelles que soit les propriétés de la matrice métallique l'allongement à la traction de la fonte grise est pratiquement nul (ne dépasse pas 0,5%), par contre la charge de rupture à la compression ou traction ainsi que la dureté sont déterminées essentiellement par la ^{matrice} métallique de la fonte.

La structure perlitique assure une tenue à l'usure et une résistance maximale. La présence de la ferrite dans la structure augmente la plasticité et la ductilité, diminue la résistance et la tenue à l'usure.

3°- L'épaisseur:

Les caractéristiques mécaniques dépendent beaucoup de l'épaisseur des pièces, car celle-ci fait varier la vitesse de refroidissement qu'elle même à une grande influence sur la grosseur et répartition du graphite, ainsi que sur la structure de la matrice.

La résistance et la fragilité varient dans le sens contraire de l'épaisseur.

II.5.2. Le tableau des caractéristiques à atteindre pour la fonte FT 20

Les valeurs sont obtenus à partir des éprouvettes tirées des barreaux bruts de coulée (30 mm de diamètre).

Désignation AFNOR	Résistance à la traction d.N/mm ²	Dureté Brinell 10 / 3000 / 15	
		∅ Empreinte	H.B.
FT 20	20 ÷ 24	44,5 $\frac{5}{16}$ 41	180 ÷ 220 230

II.6. MECANISME DE CRYSTALLISATION DU GRAPHITE LAMELLAIRE

Selon : A DESY et J. VIDTS

Le G lamellaire prend naissance et se développe au sein du liquide entectique. Le cristal en cours de croissance n'est pas

gêné par le liquide ce qui lui permet de prendre son habitus normale.

La vitesse de croissance suivant le plan de base du cristal hexagonal de graphite est un multiple de celle suivant l'axe.

Il en résulte qu'un cristal de graphite se présente sous forme de plaquette. Cette plaquette est droite lorsque le cristal se développe librement dans le liquide (Graphite primaire), par contre les cristaux de graphite entectique sont toujours incurvés et gauches, par ce que leur croissance qui commence librement est gênée par la phase austénitique qui les enveloppes.

La croissance des cristaux de graphite entectique peut-être décrite comme suit:

Le germe de graphite prend naissance dans le liquide et se développe librement jusqu'à la formation d'une petite plaquette (Fig. I.1.), Au cours de sa croissance. Au cours de sa croissance enlève le carbone de liquide en créent un gradient de concentration en carbone.

Au voisinage immédiat il se forme un germe d'austenite à partir duquel il se développe un cristal d'austenite.

Le dernier se développe très rapidement vers la plaquette de graphite le recouvre bientôt les deux places, d'abord partiellement (Fig I.2) puis totalement (Fig. I.3). Le cristal du graphite est encore en contact avec le liquide par ses extrémités il continue à croître par diffusion de carbone à travers l'enveloppe

d'austenite (~~L'épaississement~~ des lamelles) et par apport de ses extrémités.
L'épaississement

Ce qui est beaucoup plus rapide, on atteint finalement le stade de l'enveloppement total du cristal de graphite (Fig. I.4).
Fig. 1.4

MÉCANISME DE LA CRISTALLISATION DU GRAPHITE LAMELLAIRE DANS LE LIQUIDE EUTECTIQUE

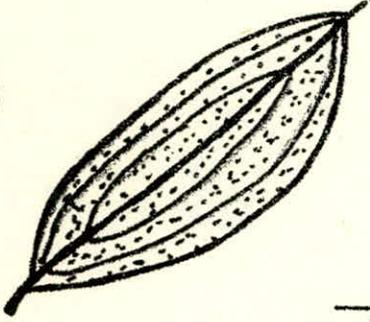
①



②



③



④

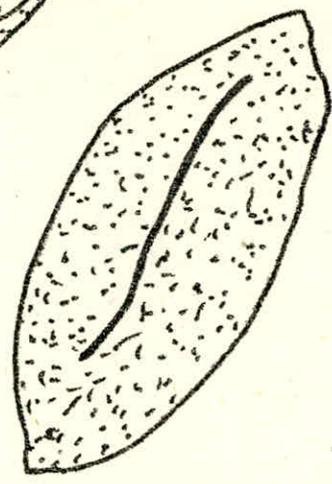
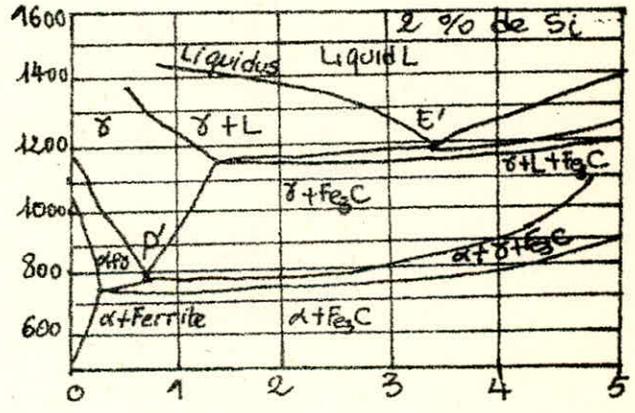
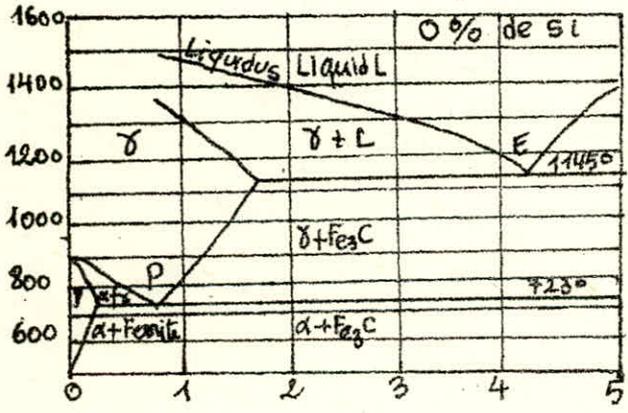


Fig I

Temperature en °C

Carbone en %

Fig II

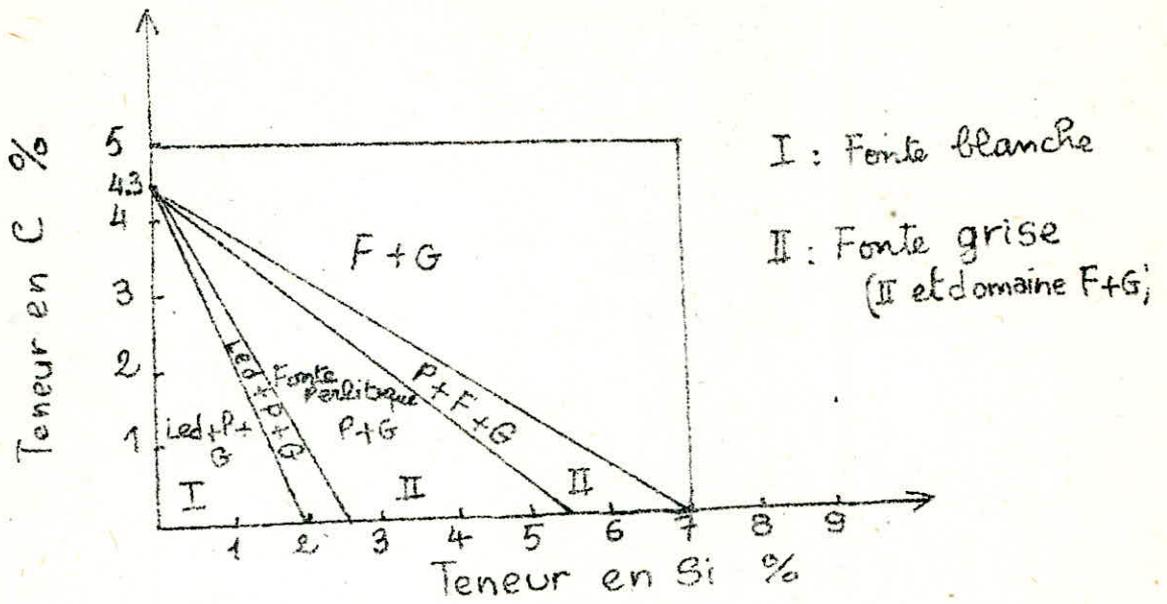


P : Point eutectoïde
E : Point eutectique

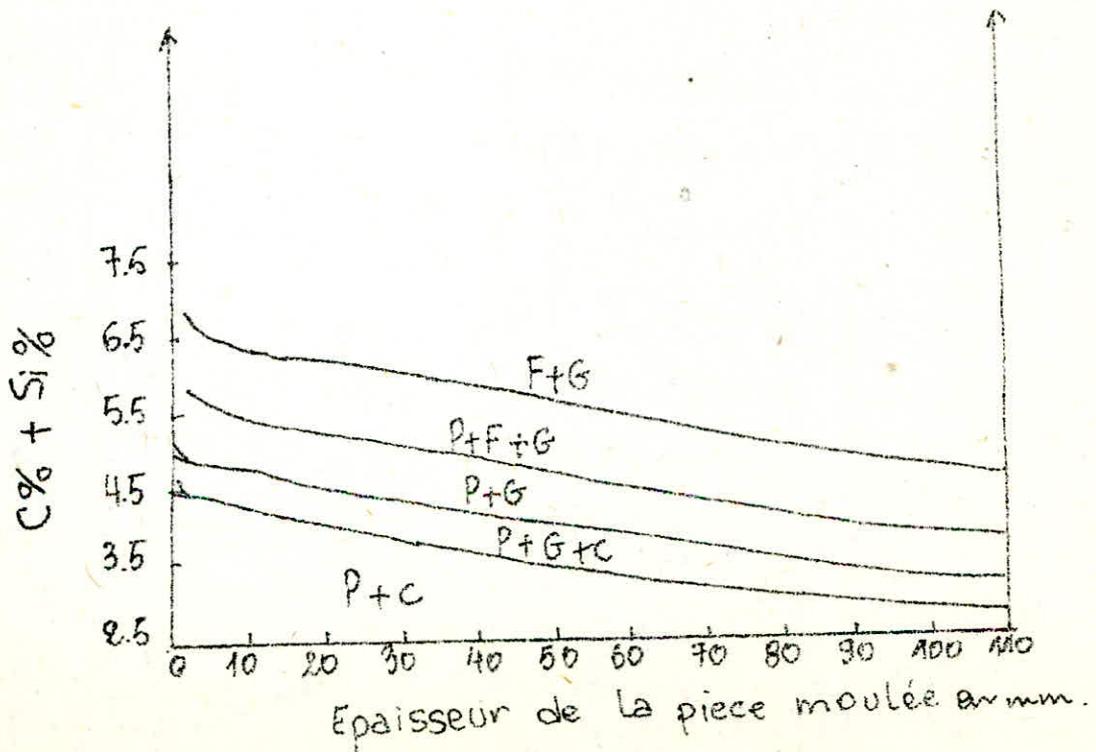
P' : Section de la vallée eutectoïde
E' : Section de la vallée eutectique

Influence du silicium sur le diagramme Fe-C

Influence du C et du Si sur la structure de la fonte



Influence de la vitesse de refroidissement (de l'épaisseur de la pièce coulée) et de la somme (C% + Si%) sur la structure de la fonte.



CHAPITRE III

TRAITEMENTS THERMIQUES

III.1. DEFINITION

C'est l'opération (ou succession d'opération) pendant laquelle un produit métallurgique est soumis à l'état solide à un ou plusieurs cycles thermiques.

Au cours de ces opérations le milieu environant les pièces peuvent modifier plus ou moins la composition chimique du métal dans les couches superficielles

III.2. BUT

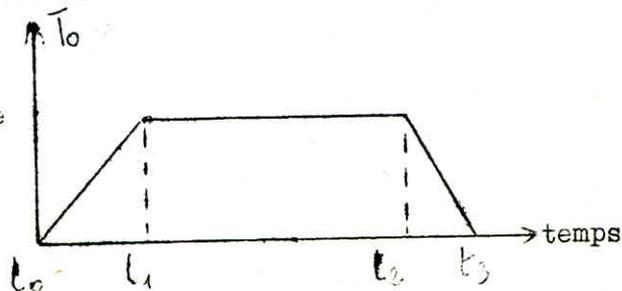
Le but d'un traitement thermique, c'est de donner au métal les propriétés particulières adaptées à sa mise en oeuvre ou à son utilisation. Il existe 3 types principaux de traitements thermiques.

- . le recuit
- . la trempe
- . le revenu

III.3. CYCLE THERMIQUE

C'est la variation de la température en fonction du temps.

Le schéma d'un cycle de traitement classique



Le cycle thermique se décompose en 3 phases;

- . chauffage
- . maintien
- . refroidissement

III.3.1. Chauffage entre T_0 et T_1 et qui est définie pour:

- . La vitesse de montée de température en fonction du matériel: four
- . de la forme et masse de la pièce

De la température à atteindre qui varie:

- . avec le métal à traiter
- . la nature de traitement

III.3.2. Le maintien entre T_1 - T_2

La durée de maintien varie en fonctions:

- . de la température atteinte
- . de la masse de la pièce
- . de l'état structural de départ, pièces écrouée, pièces de fonderie
- . Du but recherché
- . Du milieu de chauffage

III.3.3. Refroidissement entre T_2 - T_3

Le refroidissement est une opération primordiale, puisque les conditions de refroidissement qui détermine la structure finale.

Le refroidissement étant tributaire de:

- . de la matière
- . du milieu refroidisseur

III.4. MILIEU DE CHAUFFAGE

Dans un traitement thermique on cherche uniquement la modification de la structure, sans modifier, la composition chimique de la matière, mais au cours du traitement, les pièces sont exposés à l'influence de l'atmosphère de four et peuvent subir en surface des modifications chimiques (décarburation oxydation) si le chauffage, se fait dans l'air donc il est souhaitable d'utiliser une atmosphère contrôlée, qui soit neutre vis à vis de la matière.

III.5. RECUIT

Le recuit a pour but principaux d'adoucir le métal, de regagner sa structure, d'omogeniser sa composition chimique ou de réduire les contraintes internes provenant de sondage, de traitement mécaniques ou thermiques antérieurs.

Il tend à conférer à la matière un état d'équilibre sur le plan chimique structural, et mécanique.

Un état recuit de la matière correspond généralement à une ductilité importante (allongement resilience) et une faible résistance (résistance à la traction, limite élastique, dureté).

III.5.1. Cycle thermique du recuit

- Chauffage: suivant l'état de la matière, le but recherché se fera au dessus, au dessous, ou entre les limites de l'intervale $Ae1 - Ae3 - Aem$

- Un maintien à la température choisie, qui varie selon la masse de la pièce, de but recherché et de la température du traitement.
- Un refroidissement: toujours lent, soit à l'air calme soit au four.

III.5.2. Classification

Le recuit ont des effets différents sur la matière selon son état initial, par ce fait on distingue plusieurs appellations. Recuit :

- d'homogénéisation, de cristallisation
- de normalisation
- de détente
- de cristallisation
- de cristallisation
- d'adoucissement

III.5.2.1. Recuit d'adoucissement

(recuit utilisé au complexe pompe et vanne de Berrouaghia)

Son but est d'abaisser la dureté du métal de façon à favoriser son aptitude de mise en forme à froid et à faciliter l'usinage par enlèvement de copeaux.

Dans les fontes gaises, le plus souvent la structure et les propriétés désirés sont obtenus à partir de la coulée brute mais comme le processus métallurgique antérieur

donne des pièces contenant des carbures au même simplement plus de perlite qu'il ne faudrait, un traitement est nécessaire non seulement pour diminuer la dureté mais aussi pour améliorer la plasticité donc un recuit graphitisant ~~ou~~ feritissant est recommandable.

III.5.2.1.1. Recuit graphitisant (graphitisation des carbures)

Dans le cas des fontes, le recuit graphitisant est un traitement thermique d'adoucissement qui décompose les carbures libres suivant la réaction $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C \alpha$ (1)

Le carbone décomposé ~~de~~ précipite à l'état de graphite (du fait, de l'évolution du système metastable vers la forme stable).

Ce principe appelle aux remarques fondamentales suivantes
Soit la précipitation de graphite secondaire sur du graphite entectique qui augmente d'épaisseur.

Soit la précipitation du graphite secondaire libre sous forme de cheveux dans le cas d'une fonte grise lamellaire.

Ce traitement thermique à pour but de compléter la graphitisation qui n'a pas pu avoir lieu lors de la coulée. Pendant la coulée on n'a pu obtenir que le graphite primaire en première cristallisation $1,9\% < C < 5,5\%$ et le graphite entectique et on a ($\chi + Fe_e$).

Ce 2ème graphite est beaucoup plus fin que le graphite primaire, le graphite entectique (Fe_e) se précipite aux joints de grains en petites lamelles courtes.

Lors du traitement thermique en question, on a le graphite secondaire (G_s) qui est rejeté des grains γ lors du refroidissement sur la ligne A cm jusqu'à A1.

La quantité de carbone peuvent se dissoudre de γ est de 1,2 % = (1,9 - 0,7%) . 0,7% de carbure représente la structure entectoïde plastique si on continue le refroidissement dans le four, relativement faible entre A1 et A1".

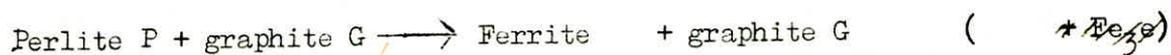
Ainsi G_s se précipite sur les lamelles de G_e Si le refroidissement est très lent le carbone de la perlite contenu à se précipiter en graphite à condition que les éléments carburigènes soient faibles.

La transformation engendre une expansion due à la différence de masse volumique entre le G ($2,2\text{g/cm}^3$) et celles des carbures ($7,9\text{g/cm}^3$).

III.5.2.1.2. Recuit ferritisant

Pour obtenir une matrice ferritique, il est plus sûr d'austeniser le métal et de le refroidit assez lentement pour qu'en franchissent l'intervalle de température de transformation.

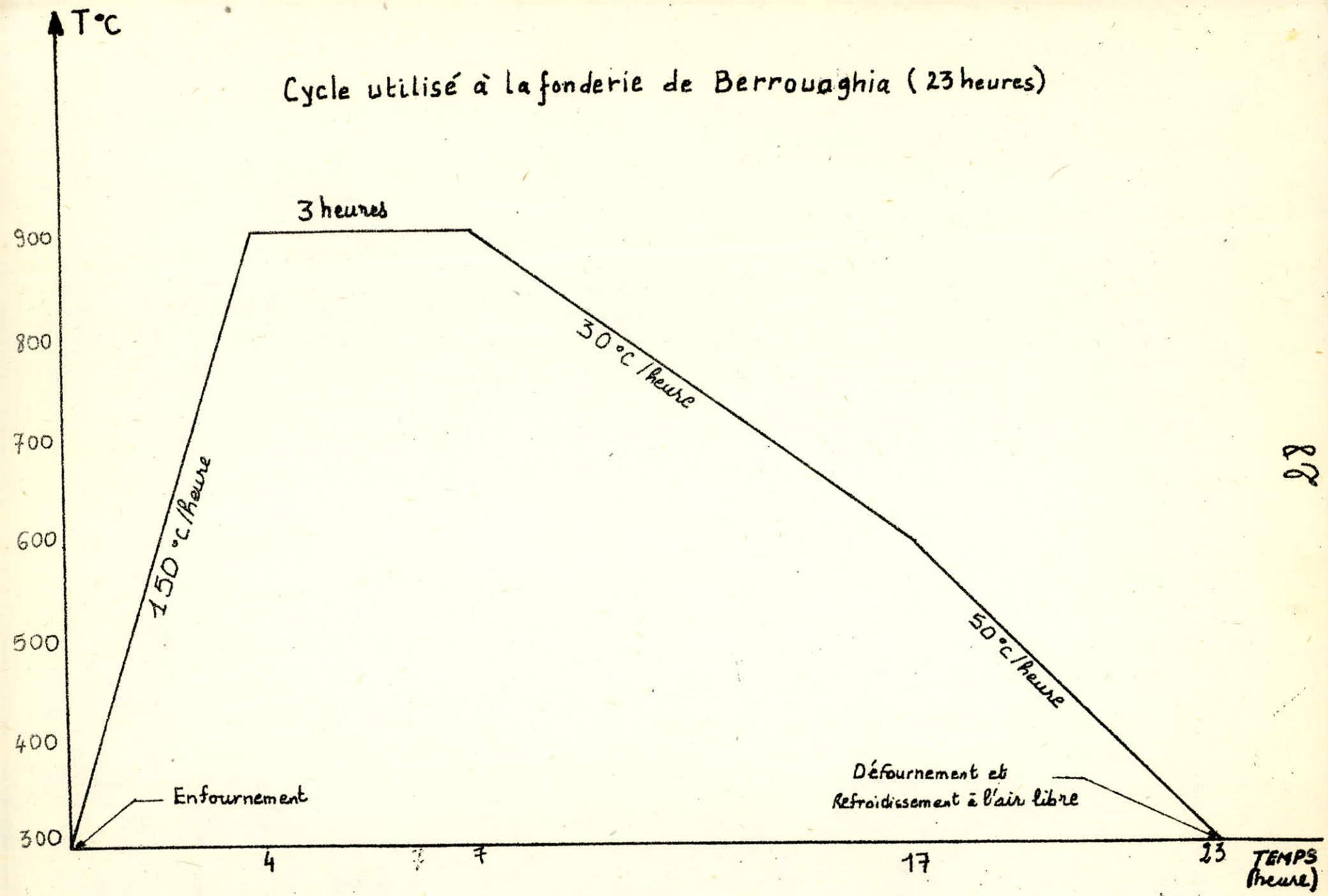
Dans le recuit graphitisant on a la décomposition de la cementite de la perlite (qui est métastable) en ferrite et graphite selon la réaction



III.6. RECUIT D'ADOUCCISSEMENT UTILISE AU C.P.V. DE BERROUGHIA (Page 28)

- En fournement se fait à 300°C
- Un chauffage de 4 heures entre (300 - 900°C) avec une vitesse de 150°C/h
- Un maintien de 3 heures à 900°C
- Un refroidissement en 2 étapes
 - * La première étape entre (900 - 600°C) de 10 heures avec une vitesse de 30°C/h
 - * La deuxième étape entre (600 - 300°C) de 6 heures avec une vitesse de 50°C/h
- Défournement à 300°C et refroidissement à l'air on constate que la durée du cycle est très longue (23 heures).
 - quatre (04) heures de chauffage n'est pas nécessaire puisque pendant le chauffage il n'ya pas de transformations principales de contraintes.
 - un maintien de 3 heures, on peut le considérer comme trop suffisant pour décomposer la cementite et de diffuser le carbone dans l'austenite (vu la forme de notre pièce).
 - Un refroidissement lent entre 900 - 600 de dix (10) heures n'est pas recommandable puisque entre 900 - 750, il n'y a aucune transformation (on y toujours dans le domaine austenitique), à partir de 750 jusqu'à 700, qu'on franchisse l'intervalle de transformation (zone critique), un refroidissement très lent est nécessaire pour ferritiser la matrice.
 - Un refroidissement entre 600 - 300 en 6 heures peut être exclu car il n'y a aucune transformation au dessous de A1, un refroidissement à l'air est plus convenable.

Cycle utilisé à la fonderie de Berrouaghia (23 heures)



88

A raison de tous ces critères, on a essayé de proposer un autre cycle plus court et économique.

III.7. CHOIX D'UNE NOUVELLE GAMME DE T.T.

III.7.1. Méthode de calcul du temps de chauffage

L'échauffement et le refroidissement des pièces métalliques lors du traitement thermique sont des opérations très délicates et importantes parce qu'elles déterminent en grande mesure la qualité du produit final.

Pour augmenter la capacité de chauffage, pour diminuer l'oxydation et la décarburation possible du métal et pour éviter la croissance exagérée des grains tient à accélérer le processus de l'échauffement.

La vitesse de l'échauffement étant déterminée par le transfert de chaleur du four au métal et par les propriétés calorifiques et physiques du métal (ainsi pour les dimensions et le mode de l'échauffement de la pièce) est souvent limitée par les contraintes thermiques, qui dépendent de la différence de température entre la surface et le coeur de la pièce.

Cette différence de la température est déterminée par deux processus, celui de l'apport de chaleur du four de la surface de la pièce et celui de la propagation de chaleur à l'intérieur de la pièce.

L'apport de la chaleur est caractérisé par la résistance thermique extérieur qui est inversement proportionnelle au

coefficient du transfert de chaleur (α) et égal à $\frac{1}{\alpha}$

La propagation de la chaleur à l'intérieur au sein de la pièce est limitée par la résistance intérieure qui est proportionnelle à l'épaisseur et inversement proportionnelle au coefficient de la conductibilité calorifique (λ).

On définit β_i = comme étant le rapport de la résistance thermique intérieure et la résistance thermique extérieure.

$$\beta_i = \frac{S/\lambda}{1/\alpha} = \frac{S\alpha}{\lambda}$$

Le processus de la propagation de la chaleur à l'intérieur du métal est considéré comme transitoire (non stationnaire) et il est décrit par l'équation différentielle de la conductibilité thermique.

$$\frac{dt}{dT} = a \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right]$$

où t est la température du point ayant les coordonnées x, y, z

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} = \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \text{ le coefficient de la conductibilité thermique}$$

γ = poids spécifique kg/m^3

c = chaleur spécifique

En général la solution de cette équation peut-être présenter sous la forme de liaison entre trois (3) criterium (Bi , F_0 et θ) et la coordonnée adimensionnelle $\frac{X}{S}$, où X est la distance à surface et S est l'épaisseur chauffée.

$$\theta = f(Bi, F_0, \frac{X}{S})$$

Pour l'utilisation pratique on présente souvent cette solution sous forme des diagramme pour les corps ayant la forme simple une plaque, un cylindre, une bille des corps aux formes différentes peuvent être ramenés à des formes simples par le calcul.

Les diagrammes de Boudine pour la surface ($\frac{X}{S} = 0$) et pour le centre ($\frac{X}{S} = 1$) de la plaque et du cylindre sont les plus répandus.

Ils permettent de résoudre des problèmes tels que:

- trouver les variations de températures du centre et de la surface en fonction du temps.
- trouver le temps nécessaire pour l'échauffement à la température voulue de la surface ou du centre.

Pour utiliser ces diagrammes on doit savoir deux criteriumes déterminés préalablement:

Bi et F_0 ou Bi et θ et puis on peut trouver le troisième θ et F_0 conformément.

- Criterium Bi

définit par:

$$Bi = \frac{\frac{S}{\lambda}}{\frac{1}{\alpha}} = \frac{S\alpha}{\lambda} \quad (1)$$

$\frac{1}{2/S}$ = résistance thermique intérieure
 $\frac{1}{\alpha}$ = résistance thermique extérieure

- Criterium de température

est défini par:

$$\theta = \frac{t_f - t_{mf}}{t_f - t_{m0}} \quad (2)$$

t_f = température du four

t_{mf} = température finale du métal

t_{m0} = température initiale du métal

- Criterium F_0 est défini par:

$$F_0 = \frac{a \tau}{S^2}$$

S = épaisseur chauffée (m)

τ = temp en h.

a = coefficient de la conductibilité thermique.

Procédé de calcul

d'après la relation (1) on calcul Bi

$$Bi = \frac{5\alpha}{d}$$

$$d = d_m = \frac{1}{2}(d_d + d_f)$$

on prend d moyen entre d_d du début et d_f de la fin de la période.

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c$$

α_r = coefficient de transfert de chaleur par rayonnement

α_c = coefficient de transfert de chaleur par convection

on prend
$$\alpha_{rm} = \sqrt{\alpha_{r0} \cdot \alpha_{rf}}$$

α_{rm} est égale à la moyenne géométrique de:

α_{r0} = coefficient du transfert de chaleur par le rayonnement pour le début de la période.

α_{rf} = coefficient de transfert de chaleur par le rayonnement pour la fin de la période.

- d'après la loi de Stefan Bltzman α_{π} est défini par la formule suivante

$$\alpha_{\pi} = \frac{\left(\frac{T_f}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_m}{100}\right)^4}{t_f - t_m} \cdot C_b$$

avec

$$C_b = \frac{4,9}{\frac{1}{\epsilon_m} + \left(\frac{1}{\epsilon_x} - 1\right) \frac{F_m}{F_b}} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h}^\circ \text{K}} \right]$$

ϵ_x, ϵ_m : degrés de noirceur du métal et du four

F_m : surface chauffé active du métal en m^2

$4,9$: Cte du rayonnement du corps noir

F_b : Surface rayonnante du four en m^2 .

Remarque: $\alpha_c = 10$ (dans les fours ou la température est plus de $400 - 1000^\circ \text{C}$).

Pour calculer le temps de chauffage il faut d'abord calculer:

- Le criterium θ_i (on utilisant la relation (2))
- Le creterium β_i (calculé précédemment)
- Le creterium F_0 en utilisant le diagramme de Boudine voir page 37).

a. temp nécessaire pour le chauffage de la surface:

dans ce cas, on utilise le diagramme de Boudrine de la surface (diagramme a page).

C'est à dire on calcul β_i et θ_i et on détermine F_0 ((à partir du diagramme(a))

$$F_0 = \frac{a\tau}{s^2} \Rightarrow \tau = \frac{F_0 s^2}{a}$$

τ_s = temp nécessaire de l'échauffement pour la surface.

b - Détermination de la température du centre t_{cf} après le temps nécessaire pour l'échauffement de la surface.

Dans ce cas on utilise les criteriums β_i et F_0 trouvés précédemment et on détermine τ_c à partir du diagramme de Boudrine du centre (diagramme b page 37)

$$t_{cf} = t_f - \theta_c (t_f - t_{co})$$

t_f = température du four

t_{co} = température initiale du centre

t_{cf} = température au centre de la pièce

c. Temps nécessaire pour l'échauffement du centre

Même chose que a, mais au lieu d'utiliser le diagramme de la surface, on utilise le diagramme du centre.

d. Détermination de la température de la surface t_s après le temps nécessaire pour chauffer le centre.

$$D'après la relation: t_{sf} = t_f - \theta_s (t_f - t_{so})$$

t_{sf} = température final de la surface

t_f = température du four

t_{so} = température initiale de la surface

θ_s est calculé d'après le diagramme de Boudrine de la surface
(diagramme a)

β_i = calculé précédemment

F_o = trouvé dans C

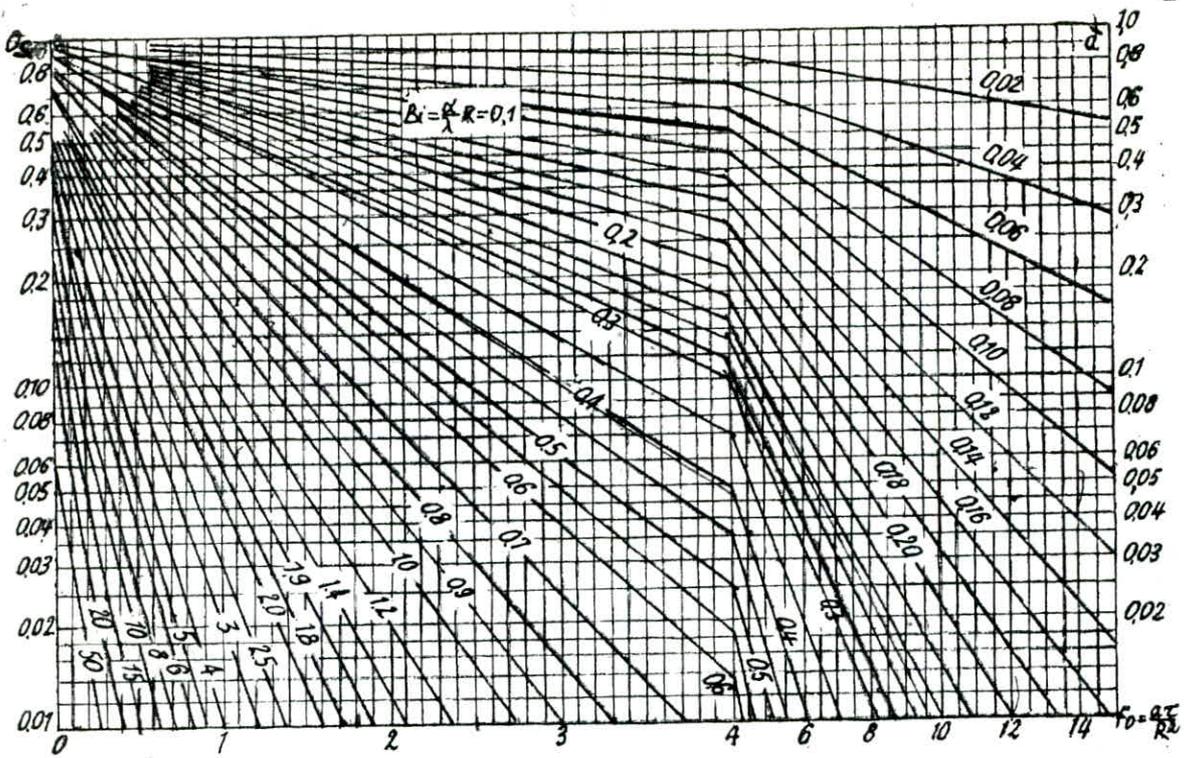
Remarque:

Il est recommandable de calculer la différence de température T entre la surface et le centre, et cette différence ne doit pas dépasser la valeur admissible (valeur max. admissible = 20°C).

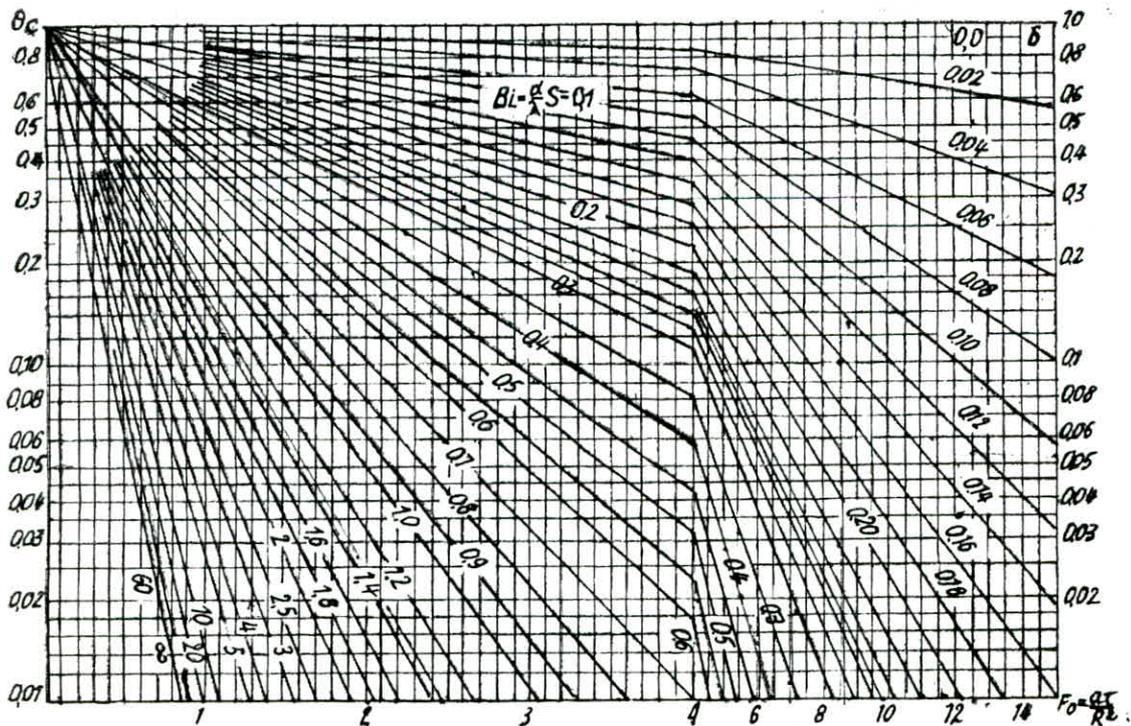
L'utilisation du diagramme de Boudrine

L'axe vertical de diagramme correspondant au criterium de la température θ .

On trace une ligne imaginaire horizontale jusqu'à l'intersection avec la ligne oblique dont le chiffre correspond à la valeur du criterium β_i , De ce point d'intersection on descend la perpendiculaire à l'axe horizontal sur lequel on lit la valeur du criterium F_o .



a)



b)

Fig.6. Nomogramme pour le calcul du chauffage du cylindre
(a - surface; b - centre)

III.7.2. Application de la méthode de calcul

$$\beta_i = \frac{S_{\alpha}}{2}$$

Calcul de d :

$$d = d_m = \frac{1}{2} (d_d + d_{\alpha}) = \frac{1}{2} (42 + 34) = 38 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}}$$

Calcul de α :

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c$$

$$\alpha_r = \frac{\left(\frac{T_f}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_m}{100}\right)^4}{T_f - T_m} \cdot c_f \quad \text{avec } c_f = \frac{4,9}{\frac{1}{\epsilon_m} + \left(\frac{1}{\epsilon_{\alpha}} - 1\right) \frac{F_m}{F_f}}$$

$$\epsilon_m = 0,78$$

$$F_m = 0 \Rightarrow \left(\frac{1}{\alpha_{\alpha}} - 1\right) \frac{F_m}{F_f} = 0$$

$$c_f = \frac{4,9}{1/\epsilon_m} = 4,9 \epsilon_m = 4,9 \times 0,78 = 3,82 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}}$$

$$T_f = 950^{\circ}\text{C} ; T_m = 900^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_{rf} = \frac{\left(\frac{1223}{100}\right)^4 - \left(\frac{1173}{100}\right)^4}{50} \cdot 3,82 = 262,8$$

$$\alpha_c = 10$$

$$\alpha_{rc} = \frac{22373 - 73,10}{930} \cdot 3,82 = 91,6$$

$$\alpha_r = \alpha_m = \sqrt{\alpha_{rc} \cdot \alpha_{rf}} = 155,15$$

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c = 165,15 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}$$

Calcul de S

$$S = 0,03 \text{ m}$$

$$\beta_i = \frac{S \alpha^2}{x \cdot d}$$

$$\beta_i = 0,13$$

Calcul de θ_s pour la surface

$$\theta_1 = \frac{t_f - t_{mf}}{t_f - t_{m0}} = \frac{950 - 900}{900 - 20} = 0,054$$

Determination de F_0 d'après le diagramme de Boudrine.

On trouve $F_0 = 11,5$

$$F_0 = \frac{a \tilde{c}}{S^2} \Rightarrow \tilde{c} = \frac{F_0 S^2}{a} = 0,73485 \text{ h} = 44 \text{ mm}$$

avec : $a = \frac{d}{c \gamma}$; $d = 38$

γ : Poids spécifique kg/m^3

c : chaleur spécifique

γ : de la fonte grise = 7100 kg/m^3

c : de la fonte grise = $0,38$

Calcul de la température du centre t_{cf} .

on a $F_0 = 11,5$

$$\beta_i = 0,13$$

On détermine θ_c (on utilise le diagramme du centre),

pour le centre :

$$\theta_c = 0,06$$

$$t_{cf} = t_f - \theta_c (t_f - t_{co})$$

$$t_{cf} = 950 - 0,06 (950 - 20)$$

$$t_{cf} = 950 - 0,06 \cdot 930 = 894^\circ\text{C} ; \quad t_{cf} = 894^\circ\text{C}$$

* Maintenant on calcul le temps nécessaire à chauffer le centre du barreaux jusqu'à la température 900°C

$$1) \theta = \frac{950 - 900}{950 - 20} = 0,054$$

$$2) - \beta_i = 0,13$$

3)- D'après le diagramme de Boudrine pour le centre on trouve

$$F_0 = 12$$

$$F_0 = \frac{a^2 \tau}{S^2} \Rightarrow \tau = \frac{F_0 S^2}{a^2} = \frac{12 (0,03)^2 \cdot 0,58 \cdot 7100}{38} = 46 \text{ mn}$$

4)- Le critère de température pour la surface sera d'après le diagramme

$$F_0 = 12, \quad \beta_i = 0,13$$

$$\theta_s = 0,045$$

$$t_s = 950 - (950 - 20) 0,045 = 908^\circ\text{C}$$

La différence de température $T = 908 - 900 = 8^\circ\text{C}$ est admissible

(valeur max. admissible 20°C). La surface sera surchauffée de 8°C .

Donc la température du four (950°C) peut assurer l'égalisation convenable de température avec un surchauffage très faible.

Conclusion:

Le temps nécessaire pour le fauffage est égale à 46 minutes, et dans notre cas on a pris 1 h de chauffage.

a)- Pour le maintien on prend 1,5 heures (pour 1 mm) \Rightarrow 3 mn

b)- Pour le refroidissement il s'effectue en 2 étapes:

a' entre 900 - 760 en 2 heures

b' entre 760 - 700 en 5 heures et après un refroidissement à l'eau l'air

III.7.3. Cycle thermique proposé (voir page 43)

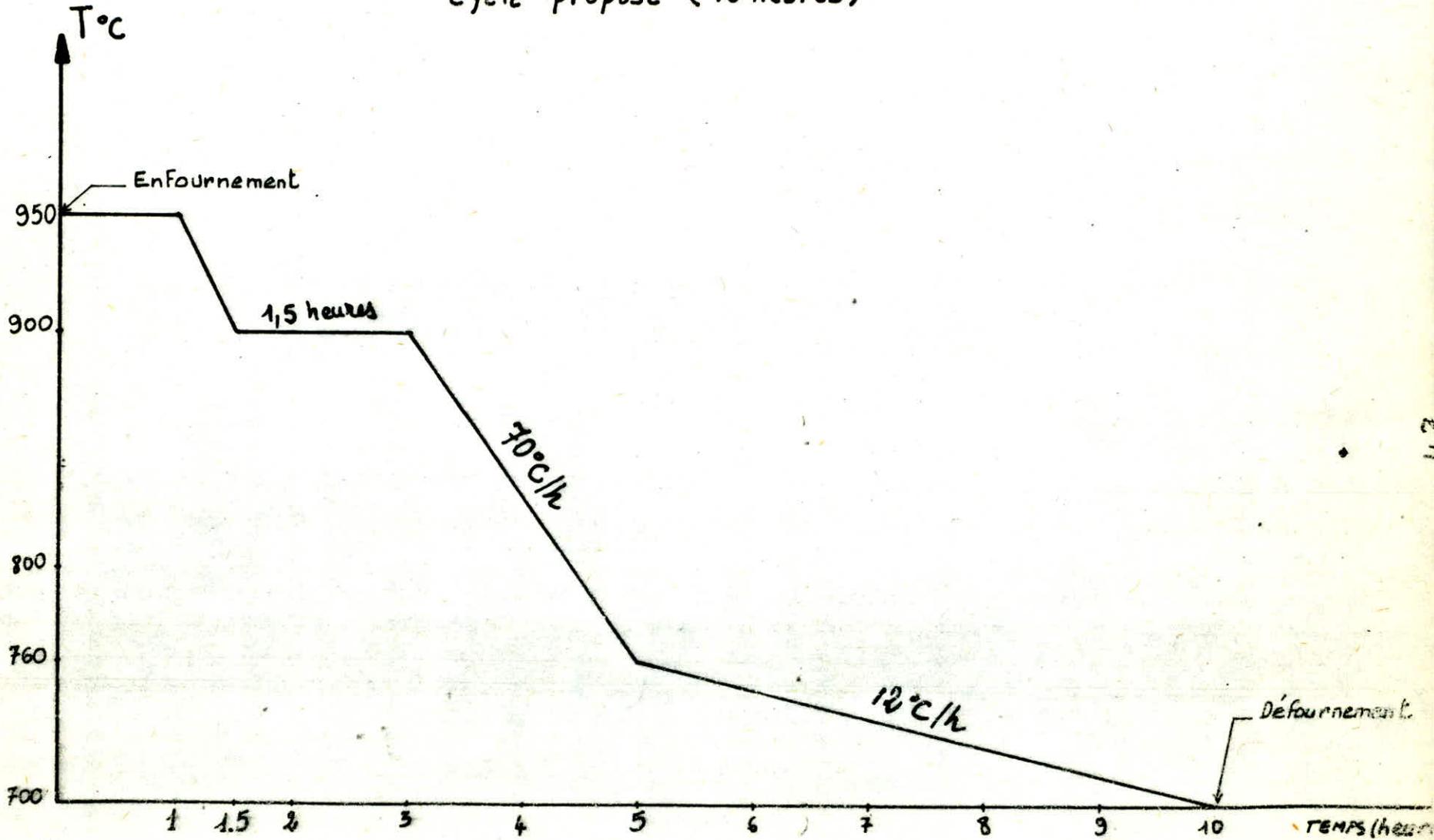
D'après les calculs faites précédemment on a trouvé que le temps nécessaire pour le chauffage est égal à 46 min (en pratique on a pris 1 heure vu la forme complexe de la pièce, car dans notre calcul on a pris comme référence un barreau de 30 mm de diamètre).

Procédé de chauffage:

- en règle le four à ~~950~~°C 950°C
- L'enfournement se fait à 950°C, la durée de chauffage est d'une heure, puis on fait un refroidissement d'une demi-heure entre (960 - 900)°C
- Un maintien d'une heure et demi à 900°C (1 mm , 3 mm).
- Puis un refroidissement en deux étapes

- . La première étape entre (900 - 750)°C en 2 heures avec une vitesse de 180°C/h.
- . La deuxième étape entre (760 - 700)°C en 5 heures avec une vitesse de 12°C/h
- Défournement à 700°C et refroidissement à l'air.

Cycle proposé (10 heures)



CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTAT

IV.1. ECHANTILLONS A EPROUVETTES

Les éprouvettes utilisées dans notre étude sont tirées de barreaux brut de coulée à part, avec du métal provenant de la poche destinée à la réalisation des pièces.

Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes de traction et de résilience ont été réalisées à l'aide d'une fraiseuse universelle et la finition à la main.

Leur dimensions sont données par la norme AFNOR:

- NFA 32 - 101 pour les éprouvettes de traction
- NFA 102- 156 pour les éprouvettes de résilience

IV.2. ESSAIS MECANIKES

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristique d'un métal ou d'un alliage:

- Résistance à la pénétration d'une pièce dure soumise à un effet constant (dureté)
- Résistance au choc (résilience)
- Aptitude à la déformation plastique ou lastique pour essai de traction (ou compression).

Les résultats obtenus à partir de ces différents essais qui mettent en oeuvre des techniques particulières.

- Eprouvettes de formes et dimensions bien définies
- Appareils conçus spécialement à ces efforts avec des conditions d'emploi bien précises sont en relation directe avec la structure du métal et permettent de prévoir son comportement dans les conditions réelles d'utilisation.

IV.2.1. Essai de traction

IV.2.1.1. Pratique de l'essai de traction

Cet essai est effectué de la façon suivante:

On a découpé dans le métal à essayer une éprouvette cylindrique de section initiale S_0 et de longueur initiale L_0 , sur laquelle on a exercé un effort de traction appliqué de façon continue selon l'axe de l'éprouvette jusqu'à la rupture et à enregistrer la déformation de l'éprouvette

$L - L_0$ $L =$ longueur finale

$L_0 =$ longueur initiale

en fonction de la charge appliquée

Les caractéristiques mécaniques fournies par l'essai de traction sont:

- la limite élastique R_e (daN/mm^2)
- La charge de rupture R_r (daN/mm^2)
- L'allongement A %
- La striction Z %

* Limite élastique: c'est la contrainte minimale qui produit une déformation permanente du métal.

* La charge de rupture R: Lorsque on passe la limite élastique et on continue à exercer une tension sur l'éprouvette on passe par un maximum, ce maximum ^{est la} résistance à la traction

$$* Re = \frac{Ce}{So} \quad Ce : \text{charge à la limite élastique}$$

So : Aire de la section de l'éprouvette avant

$$* R = \frac{Cr}{So} \quad \text{essai}$$

Cr : Charge maximale supportée par l'éprouvette

$$* A \% = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100$$

$$* Z \% = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100$$

L'appareil utilisé pour cet essai est une machine universelle de traction du type U.S.D.R.

IV.2.1.2. Dimension des éprouvettes (voir page 55)

Les diagrammes caractéristiques de traction (voir pages 56, 57, 58).

- a. l'état brut
- b. après traitement (cycle de 23 heures à l'échelle industrielle)
- c. Après traitement (cycle de 19 h ;
- d. Après traitement (cycle de 23 h à l'échelle de laboratoire

L'état brut

- La charge appliquée: $Cr = 6330 \text{ daN}$ pour $So = 314 \text{ mm}^2$

d'où la charge à la rupture $Rr = 20,15 \text{ daN/mm}^2$

- La charge à la limite élastique:

$$C_e = 4283 \text{ daN pour } S_o = 314 \text{ mm}^2$$

$$R_e = 13,64 \text{ daN/mm}^2$$

L'état traité (cycle de 23 heures) à l'échelle industrielle:

- La charge à la rupture

$$C_r = 4366 \text{ daN pour } S_o = 314 \text{ mm}^2 \quad R_r = 13,9 \text{ daN/mm}^2$$

- La charge élastique

$$C_e = 2266 \text{ daN, pour } S_o = 314 \text{ mm}^2$$

$$R_e = 7,21 \text{ daN/mm}^2$$

L'état traité (cycle de 23 h à l'échelle de laboratoire

- La charge à la rupture: $C_r = 4350 \text{ daN pour } S_o = 314 \text{ mm}^2$

$$R_r = 13,85 \text{ daN/mm}^2$$

- La charge élastique daN pour $S_o = 314 \text{ mm}^2$

$$R_e = 7,16 \text{ daN/mm}^2$$

L'état traité (cycle proposé : 10 h)

- La charge à la rupture : $C_r = 4710 \text{ daN pour } S_o = 314 \text{ mm}^2$

$$R_r = 15 \text{ daN/mm}^2$$

- La charge élastique

$$C_r = 2292 \text{ daN pour } S_o = 314 \text{ mm}^2$$

$$R_e = 7,3 \text{ daN/mm}^2$$

IV.2.2. Essai de Resilience

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, l'éprouvette entaillé (en U) en son milieu et reposant sur 2 appuis.

La résilience est définie comme étant le rapport entre l'énergie (W) absorbée par la rupture et la section au droit de l'entaille (cm^2).

- L'essai a été effectué conformément à la norme AFNOR A.03.156, sur une machine de résilience CHARPY type N-Ne 2701.

avec poids du pendule = 23,525 Kg

Rayon du pendule = 0,671 m

Dimension de l'éprouvette (voir page 55)

IV.2.2.1. Résultats expérimentaux

A l'aide de l'angle X qui est directement sur le cadran du dispositif, on détermine la résistance K . Dans notre cas on a utilisé un tableau qui donne directement la valeur de résilience K à partir de l'angle X , les résultats sont donnés dans le tableau ci après (voir tableau N° 2).

page 54

IV.2.3. Essai de dureté

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui, pour des conditions expérimentales données, la dureté est d'autant plus grande que la pénétration du corps est plus faible.

Le principe de l'essai consiste à exercer sur un poinçon de forme (conique, sphérique ou pyramidal) une force constante pendant un temps donné.

IV.2.3.1. L'essai Brinell

Principe:

L'essai de dureté Brinell consiste à enfoncer une bille en acier dur, d'un diamètre donné, en exerçant une pression continue et constante.

On mesure le diamètre obtenu et on calcule la surface de l'empreinte (assimilé à une calotte sphérique).

La dureté Brinell est définie par $HB = \frac{P}{S}$

$\frac{P}{S}$ = étant la force en daN exercée sur la bille

S = est calculé par la formule $S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$

où d est le diamètre de la circonférence de l'empreinte

* L'essai a été effectué conformément à la norme AFNOR A.03.201 sur une machine S.K.F. type 09.

IV.2.3.2. Résultat de la dureté Brinell

On connaît la charge P (charge appliquée sur le poinçon) le diamètre D de la bille et d celui de l'empreinte ou peut déterminer HB .

$P = 3000$ daN ; $D = 10$ mm

$4,4 \leq d \leq 4,5$ mm pour l'état brut

$5,5 \leq d \leq 5,55$ mm pour l'état traité (cycle 23 h à l'échelle industrielle)

$5,5 \leq d \leq 5,54$ mm pour l'état traité (cycle 23 h à l'échelle de laboratoire)

$5,3 \leq d \leq 5,4$ mm l'état traité (pour le cycle proposé de 10h).

Résultat voir tableau N° 2.

IV.3. MICRODURETE

Les essais de microdureté ce sont des essais de dureté Vickers effectués sous de très faible charge. Les empreintes ont des dimensions de l'ordre de quelque microns.

IV.3.1. Essais Vickers

L'empreinte Vickers est une pyramide Si S est sa surface latérale, on définit la dureté Vickers Hv par la relation :

$$Hv = \frac{P}{S}$$

P = la charge appliqué au pénétrateur

S = surface latérale

d = diagonale du carré d'intersection de l'empreinte avec la surface libre du métal

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \frac{68}{2}} = \frac{136}{2} \quad ; \quad Hv = \frac{P}{S} = \frac{2 P \sin 68}{d^2} = 1,854 \text{ u } \frac{P}{d^2}$$

d = est mesuré à l'aide d'un microscope à oculaire micrométrique

IV.3.2. Résultats expérimentaux

P = 300 g

d = est mesuré à l'aide d'un microscope à oculaire micrométrique

et on a utilisé un tableau qui donne directement les valeurs Hv en fonction de d.

Tableau N° 9 1

l'état	N° d'essai										Hv
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
L'état (Hv _P)	241	198	214	232	206	202	210	220	205	218	214,6
L'état traité:Hv (cycle de 23 h. à l'échelle in- dustrielle)	117	132	117	132	120	116	130	117	120	126	120
L'état traité:Hvx (cycle 23h à l'échelle de laboratoire)	120	130	118	122	130	130	126	124	118	128	125
L'état traité (cycle proposé de 10 h. Hvx)	140	150	145	114	145	120	125	124	150	140	140

IV.4.1. Micrographie

Une opération de micrographie nous permet de mettre en évidence les constituants des produits à étudiés, cet opération comporte 3 étapes :

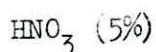
- Polissage
- L'attaque
- L'examen du microscope, accompagné de la prise d'une photographie.

Notre étude a été réalisé à l'aide d'un microscope de marque ZEISS au laboratoire fonderie CPV de Berrouaghia, la préparation des échantillons a été faite de la façon suivante:

-- Prélèvement

- Enrobage: les échantillons ont été enrobé à froid avec de la résine.
- Pollissage: le pollissage a été effectué sous un courant d'eau avec du papiers abrasifs en passant par plusieurs étapes:
 - . pollissage grossier avec papier emeri 120 - 320 - 600.
 - . Pollissage fin avec papier emeri 1000,
 - . Finition à l'aide d'un feutre et de la pâte diamenté et un lubrifiant.

* Attaques: l'attaque se fait avec le nital de composition :



La durée d'attaque est de 15 - 20 seconde.

IV.4.2. Résultats expérimentaux

L'étude a été faite sur microtirés de barreaux

IV.4.2.1. L'état brut de coulée

La figure (Page 59) montre que la structure est perlitique à 95 % avec un graphite:

de {
Forme I
Répartition A
Dimension 4 : 0,12 à 0,25

IV.4.2.2. L'état traité (cycle de 23 heures à l'échelle industrielle)

La figure (Page 60) montre que la structure est ferritique à 100 % avec un graphite

de {
 Forme 1
 Répartition B
 Dimension 2

IV.4.2.3. L'état traité (cycle 23 heures à l'échelle ^{de Laboratoire} ~~industrielle~~)

La figure (Page 61) montre que la structure est
ferretique à 100 % avec un graphite:

de {
 Forme de graphite 1
 Répartition A
 Dimension 4

IV.4.2.4. L'état traité (cycle de 10 heures)

La figure (Page 62) montre que la structure est
ferrique à 95% avec un graphite

de {
 Forme 1
 Répartition ~~F~~ A
 Dimension 4

La forme , répartition et dimension du graphite ont
été déterminé suivant la disposition de norme AFNOR
32.100

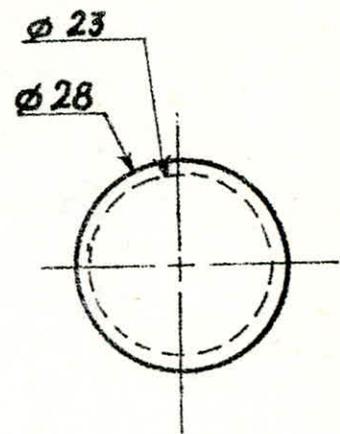
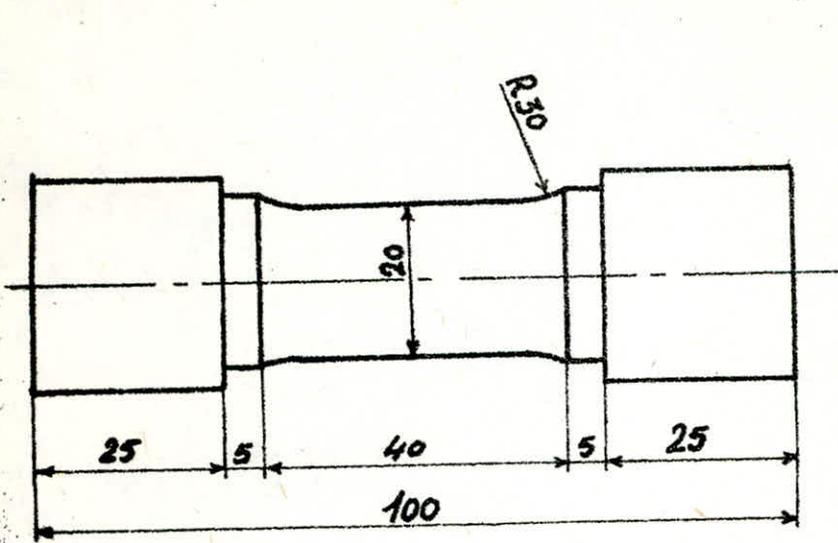
Tableau récapitulatif des résultats

Traitement effectué	Rr (daN/mm ²)	Re (daN/mm ²)	K (daN/mm ²)	dureté HB	Micro-dureté HV	Structure
L'état brut	20,15	13,64	0,76	181,6	214,6	perlitique 95%
Cycle de 23 h à l'échelle industrielle	13,9	7,2	0,56	115	120	ferritique 100%
Cycle 23 h à l'échelle de laboratoire	13,85	7,36	0,54	114	125	ferritique 100%
Cycle proposé de 10 heures	15	7,3	0,6	140	140	ferritique 95%

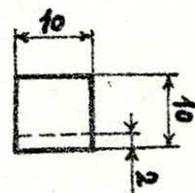
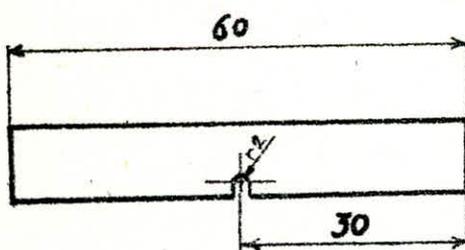
Chaque valeur sur le tableau correspond à une moyenne de trois essais

Tableau des caractéristiques selon le cahier de charge

	L'état brut	après traitement
Résistance à la rupture (daN mm ²)	20 - 24	15 - 20
Dureté HB	180 - 280	180 - 130
Structure	Perlitique	Ferritique (à 9A - 130)



EPROUVETTE DE TRACTION



EPROUVETTE DE RESILIENCE

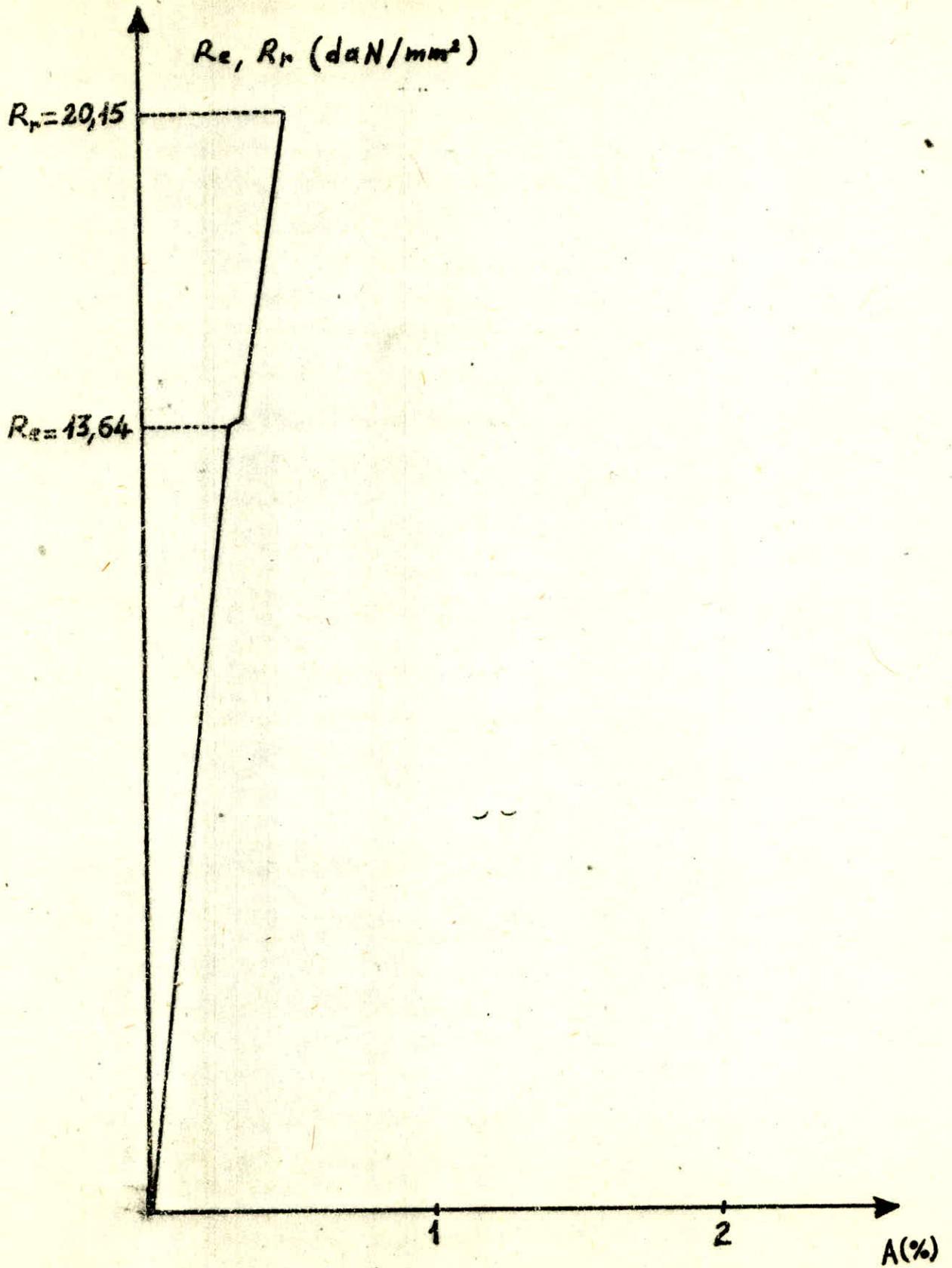


Diagramme - Caractéristique de traction Ft 20
(Etat brut)

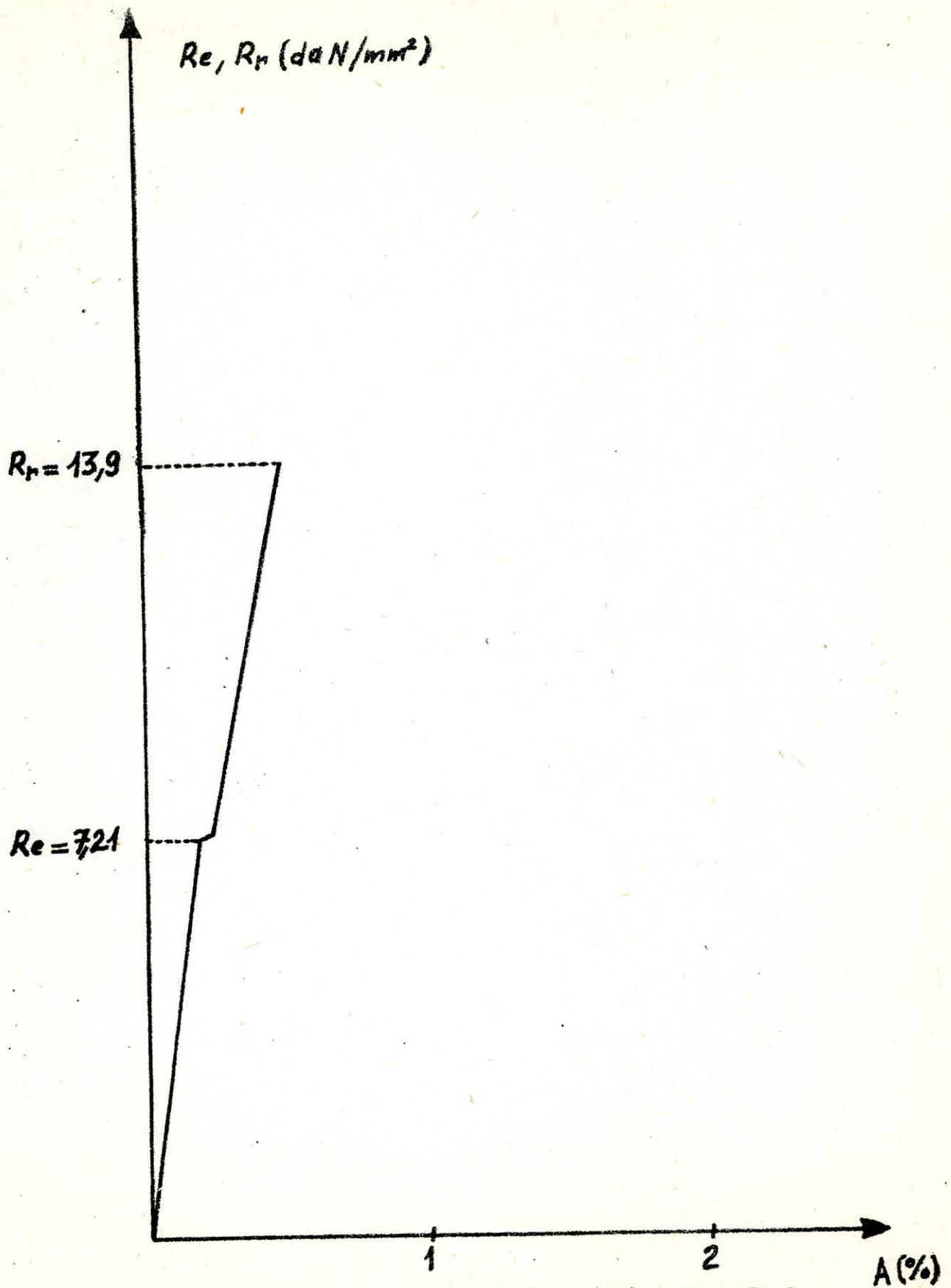


Diagramme - Caractéristique de traction FT 20
(Traitement actuel)

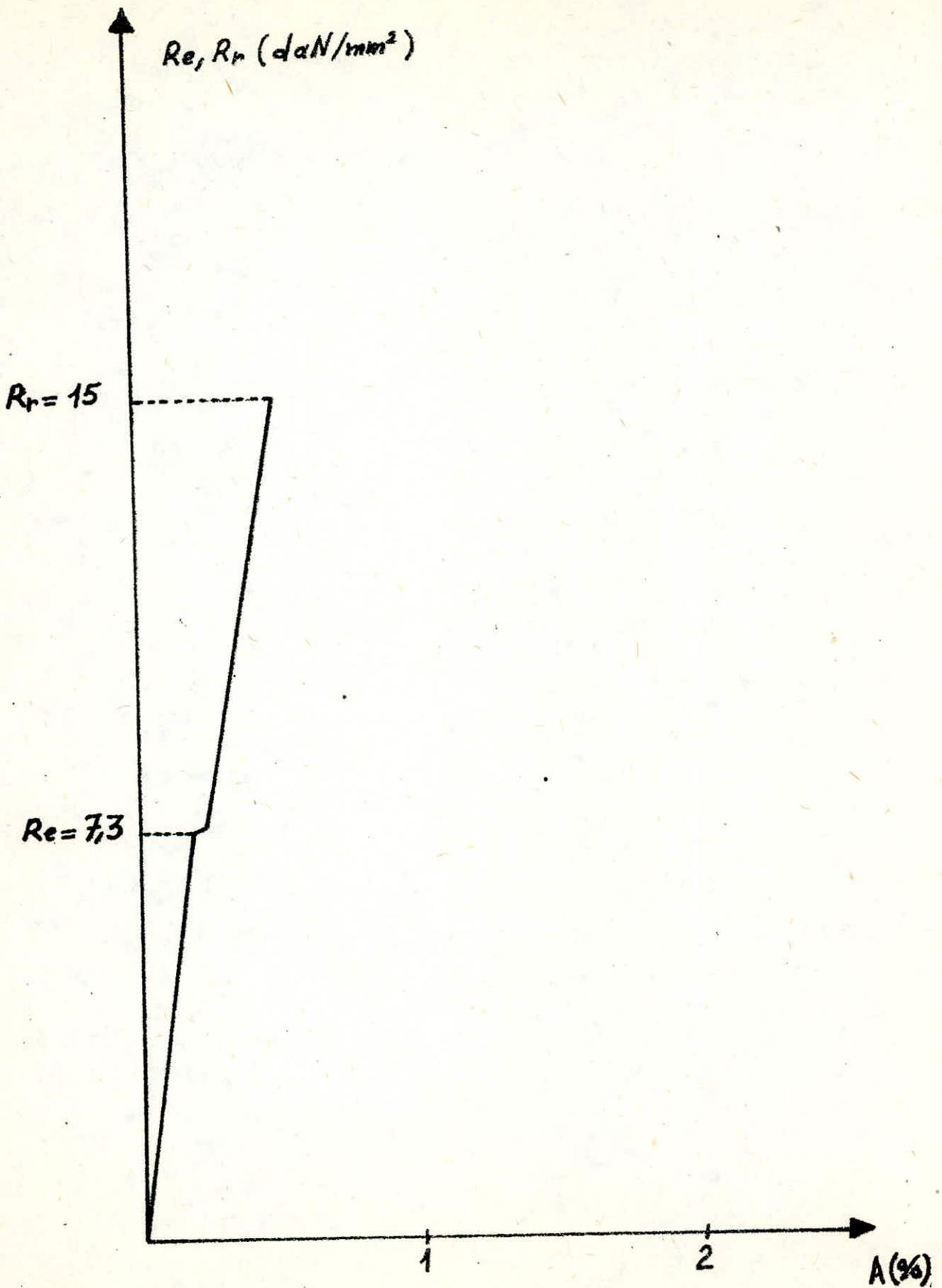


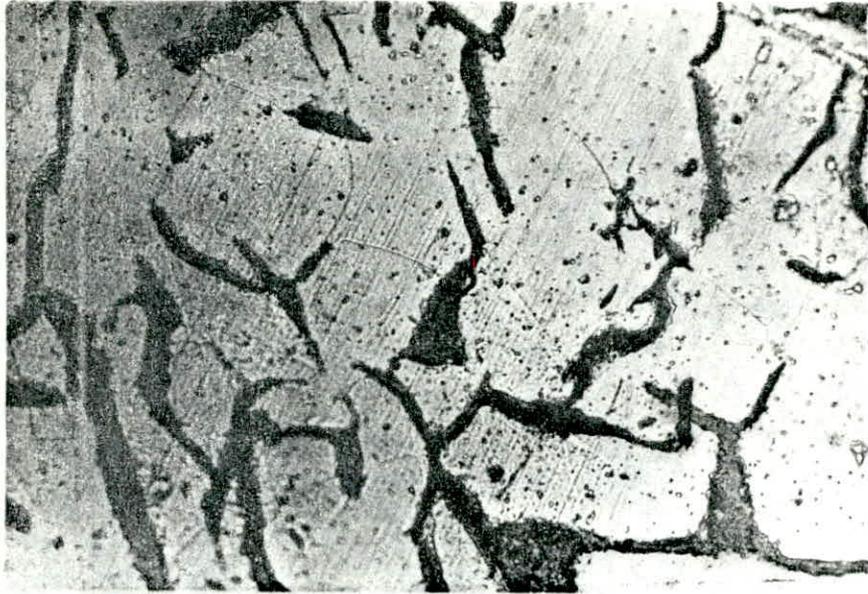
Diagramme . Caractéristique de traction Ft 20
(Traitement proposé)



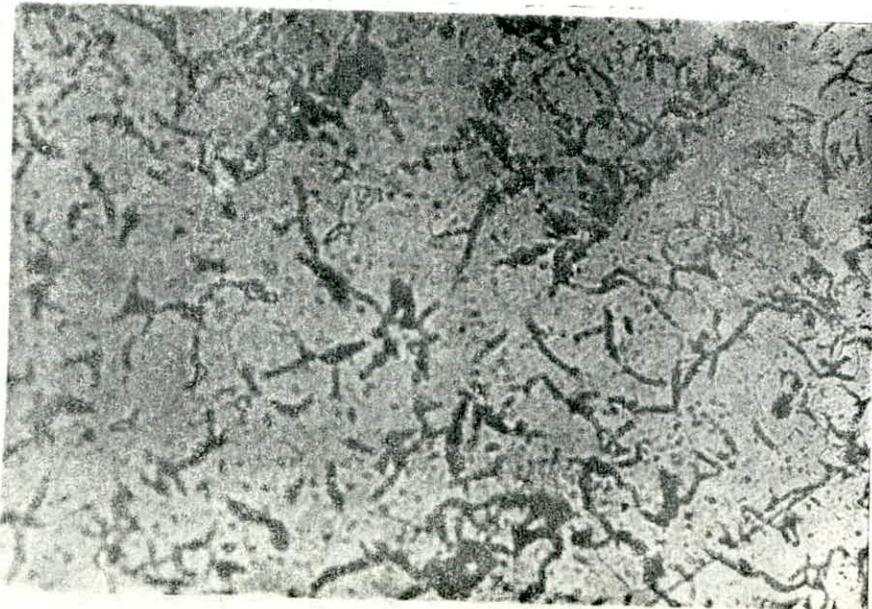
Fonte Ft 20 : St perlitique
Brute de coulée
NITAL x 500



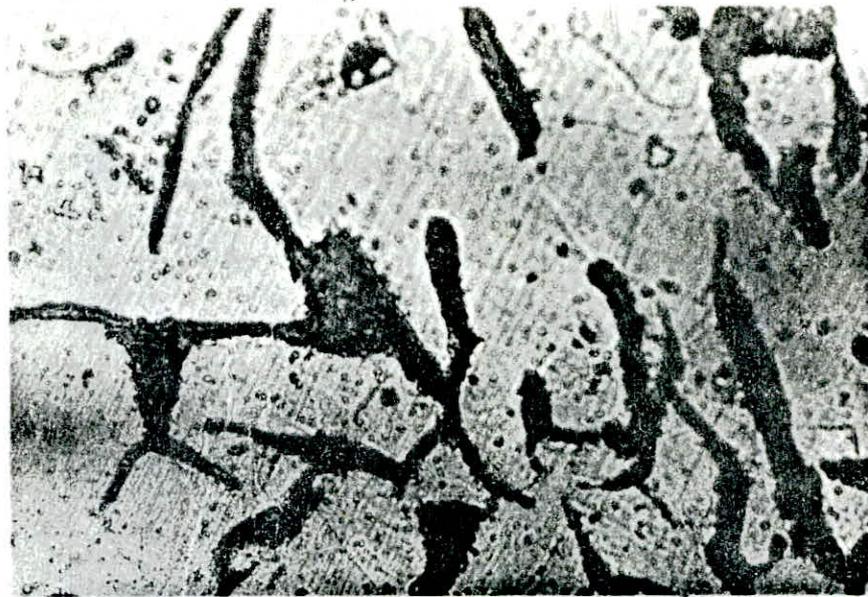
Fonte Ft 20 : St perlitique
Brute de coulée. Nital x 100



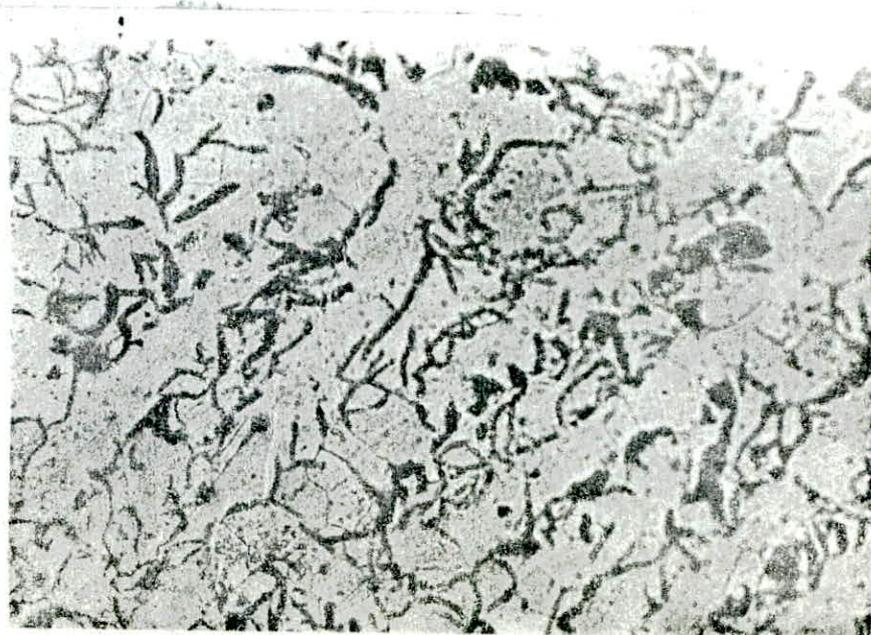
Structure ferritique
Recuit de 23h-A
G: 500



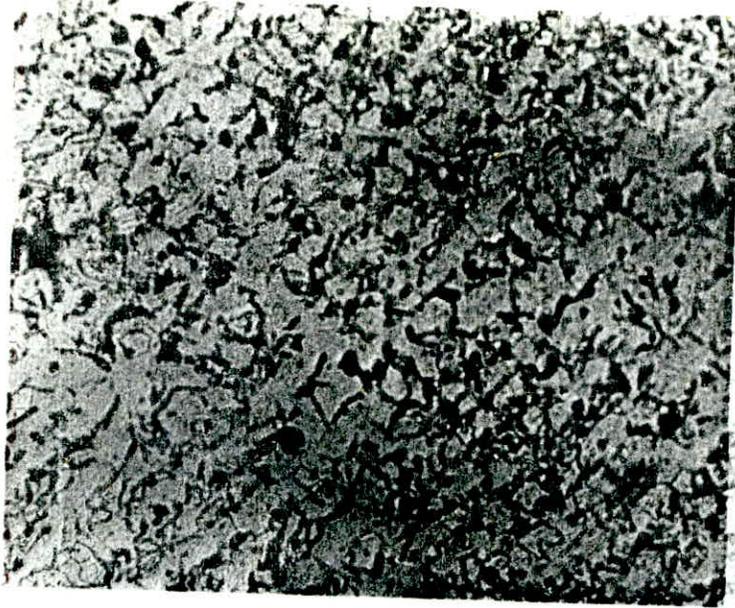
Structure ferritique
Recuit de 23h-A
G: 100



Structure ferritique
Recuit de 23h - B
G: 500



Structure ferritique
Recuit de 23h - B
G: 200



Structure ferritique

Recuit de 10h

G: 100



Structure ferritique

Recuit de 10h

G: 200

C H A P I T R E V

INTERPRETATION DES RESULTATS

V.1. PROPRIETES DE TRACTION

D'après les expériences de traction faites sur les trois cas (brut , cycle de 23 heures, cycle de 10 heures), on peut tirer les conclusions suivantes:

V.1.1. Résistance à la rupture

A l'état brut de coulée, la résistance à la rupture est de 20,15 daN/mm². Le traitement actuel donne une valeur de résistance à la rupture de 14 daN/mm². Avec le traitement proposé, nous avons obtenus une valeur de 15 daN/mm². La marge des valeur de résistances à la rupture demandée par le cahier de charge est comprise entre 15 et 20 daN. Le résultat trouvé avec le cycle de traitement proposé répond bien aux conditions exigées.

V.2. DURETE

Les valeurs de dureté obtenues par l'essai Brinell effectué sur trois types de fonte (état brut, traitement actuel, traitement proposé). sont respectivement 181,5 HB, 115 HB et 140 HB.

Nous constatons une large différence entre la dureté des fonts obtenue après traitement actuel et celle obtenue après le traitement proposé (25 HB).

La dureté de 115 HB est inacceptable, par contre la dureté de 140 HB est dans les normes (130 - 180). HB.

V.3. STRUCTURE

Les différences de structures matérielle des 3 types de fonte sont à la base de l'explication des différences de valeurs constatées dans les caractéristiques mécaniques (Rr, HB).

Les valeurs élevées de dureté et de résistance à la rupture dans la fonte à l'état brut sont dues essentiellement à sa structure perlitique (95 % perlite

La fonte obtenue après traitement thermique actuel a une structure totalement ferrite (100 %). Le traitement thermique proposé à pour effet de diminuer le taux en ferrite et d'augmenter le taux en perlite (95 % ferrite - 5% perlite).

C O N C L U S I O N

Notre étude a démontré que dans le cas particulier des fontes grises lamellaires, la structure ferritique peut être obtenue par différents cycles de traitement thermique.

Le cycle proposé possède une durée plus courte et permet d'atteindre des caractéristiques mécaniques qui répondent mieux aux conditions exigées par le cahier de charge.

Ce projet révèle un grand intérêt du côté économique. En effet, la diminution de la durée d'exécution d'une tâche industrielle pourrait avoir un impact sur la diminution du prix de revient du produit final et en particulier si la tâche est critique (c'est à dire elle doit commencer et finir en des temps bien définis).

Nous espérons que ce travail soit complété par une étude de technico-économique mettant en relief l'aspect comparatif entre les deux quantités d'énergie dépensée pendant les deux cycles de traitement.

REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE

1. LAKEFINE: Metallographie et traitements thermiques des métaux
Edition MIR 1978.
2. A. DESY et JULIEN VIDTS: Metallurgie structural
Edition NICI et DUNOD 1962.
3. A. ROOS: Précis de Métallurgie appliquée
Edition DUNOD - BORDAS 1962
4. Polycope Bernard SCHMIT : Metallurgie physique (ENP)
5. Technique de l(ingénieur 4 1982
Elaboration des fontes
Moulage et fonderie de la fonte
6. Revue de traitements thermiques N° 195 Octobre 1985
7. Revue de traitements thermiques n° 194 Aout - Septembre 1985
8. KATARGUINE A.: calcul des Fours métallurgiques Tome 1
9. MICHEL GEIER : Métallurgie de fonderie
10. REIFFERSHEID: Caractéristiques mécaniques Fonderie N° 381 - 1978
11. TECHNOLOGIE Industrielles RENAULT
12. G. SVET: Pratique des traitements thermiques des métaux industriels.

