

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

16/95

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

EXPERTISE D'UN ARBRE A CAMES D'UNE
VOITURE RENAULT 11

Proposé par ; E. SALHI

Etudié par : M. SEKOUM

Dirigé par : E. SALHI

PROMOTION : Septembre 1995

DEDICACES



Je dédie ce modeste travail à:

- La mémoire de ma mère
- Mon père
- Mes frères et soeurs
- Toute la famille
- B. Mahfoudi et l'équipe de l' ASUC El-Harrach
- Tous mes amis et copains.

REMERCIEMENTS



Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur E. SALHI maître conférence au département de Métallurgie (ENP)

Je remercie profondément, mon promoteur E. SALHI qui était à l'origine de ce travail, qu'il trouve ici mes vifs remerciements depuis mes débuts au laboratoire et le suivi continu pendant toute la période de projet.

Je remercie vivement tous les enseignants du département de Métallurgie qui ont contribué à ma formation.

Pour la même occasion j'exprime ma sincère gratitude à tous les membres du jury, qui ont bien voulu accepter de participer à l'évaluation de ce modeste travail.

J'adresse mes plus sincères remerciements à:

- Mr ABID responsable du laboratoire de chimie de la S.N.V.I (C.V.I) de Rouiba
- Mr S. ZOUYED ingénieur au laboratoire de l'U.R.F.
- Mr S. NAIT ALI NACER responsable du laboratoire de Métallurgie des poudres (A.C.R)
- Mr OUALEM SEDDIK ingénieur au C.S. Cheraga

Je ne termine pas sans remercier toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

ABREVIATION ET SIGLES:



C_1, C_2, C_3 : Les échantillons de la came

P_a : L'échantillon du palier

P_i : L'échantillon du pignon

A : L'échantillon de l'arbre

T_s : Taux de sphéroïdisation

N : Nombre total de particules

N_s : Nombre de particules de forme sphérique

\bar{d} : La taille moyenne du graphite

σ : L'écart type

n_i, d_i : Nombre et taille moyenne des particules dans l'intervalle considéré $[i-1, i]$

HRC : Dureté Rockwell

HV : Dureté Vickers

D : Diagonale moyenne

G: graphite

γ : L'austénite,

α : La ferrite,

Fe_3C : cémentite

V_a : Vitesse d'apport d'atome de carbone par diffusion à travers la gaine d'austénite

V_c : Vitesse de cristallisation du graphite

P : Epaisseur de la zone trempée (mm)

ρ : Résistance électrique Ω mm

μ_r : Perméabilité magnétique relative (H / mm)

F : Fréquence en KHz

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA PIECE A EXPERTISER	2
1.1- Dessin technique de la l'arbre à cames	3
1.2- Fonctionnement de l'arbre à cames	3
1.3- Sollicitation de l'arbre à cames	4
CHAPITRE II: PARTIE EXPERIMENTALE	6
2.1- Préparation micrographique des échantillons	6
2.2- Analyse chimique	9
2.3- Etude métallographique quantitative et qualitative	9
2.4- Essai de dureté et de microdureté	13
CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS	16
3.1- Analyse chimique	16
3.2- Observation micrographique	16
3.2.1- <i>Des cames et des paliers</i>	17
3.2.2- <i>De l'arbre et du pignon</i>	21
3.3- Analyse quantitative et qualitative	23
3.3.1- <i>Taux de forme</i>	23
3.3.2- <i>Fraction volumique</i>	23
3.3.3- <i>La taille moyenne du graphite</i>	24
3.4- Essais de dureté et de microdureté	27

CHAPITRE IV: **ETUDE DU MATERIAU DE L'ARBRE** — 32

A CAMES

4.1- Elaboration	32
4.2- Composition chimique des fontes G.S	33
4.3- Mécanisme de sphéroïdisation du graphite	36
4.4- Structure	37
4.5- caractéristiques Mécaniques	37

CHAPITRE V: **GAMME DE FABRICATION DE L'ARBRE A CAMES** — 39

5.1- Traitement de ferritisation	40
5.2- Gamme des opérations d'usinage	41
5.3- Traitement de perlitisation	42
5.4- Trempe à haute fréquence	42

CONCLUSION — 47

ANNEXE — 48

BIBLIOGRAPHIE — 52

Introduction:

Les matériaux métalliques constituent un outil de base pour l'industrie. Il est nécessaire de bien caractériser les propriétés chimiques, physiques et mécaniques de ces matériaux. Ces caractérisations s'effectuent par une expertise.

L'objet de notre étude se résume à faire une expertise d'une pièce mécanique d'un arbre à cames d'un moteur d'une voiture Renault 11. Cette étude consiste à identifier la nature du matériau du point de vue composition chimique, structurale et propriétés mécaniques.

Le premier chapitre consiste à la présentation de la pièce (dessin technique , fonctionnement et sollicitations).

Le deuxième chapitre est consacré à la partie pratique et les techniques expérimentales utilisées.

Dans le chapitre III on a présenté les résultats et les discussions.

Les chapitres IV et V représentent respectivement une étude bibliographique relative au matériau de la pièce et sa gamme de fabrication

Le chapitre VI est une conclusion générale

Chapitre I

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA PIECE A EXPERTISER

La pièce à étudier dans notre projet, est un arbre à cames d'une voiture RENAULT11.

I.1- Dessin technique de l'arbre à came:

Le dessin technique de l'arbre à cames est présenté sur la planche 1

I.2.Fonctionnement de l'arbre à came: [1], [2], [3]

L'arbre à came est un organe qui sert à commander l'ouverture et la fermeture des soupapes, il maintient les soupapes ouvertes pendant le temps nécessaire à la course du piston. Chaque soupape du moteur correspond à une came.

L'arbre à cames, est entraîné par le vilebrequin à l'aide d'une chaîne ou par engrenage à pignon. Il est parfois situé en tête, au-dessus des soupapes et agissant sur elles directement, mais généralement c'est à la partie inférieure du bloc-cylindre qu'il se trouve, comme représenté sur la figure 1

Chaque came forme une saillie excentrique qui agit sur le poussoir, ce dernier, pousse la tige du culbuteur, dont la poussée incline le culbuteur qui comprime le ressort de soupape et soulève la soupape.

La position des cames sur l'arbre et leur profil sont déterminés par la nécessité d'ouvrir les soupapes à des instants précis, de les maintenir ouvertes le plus longtemps possible tout en assurant une levée et une décente suffisamment douce.

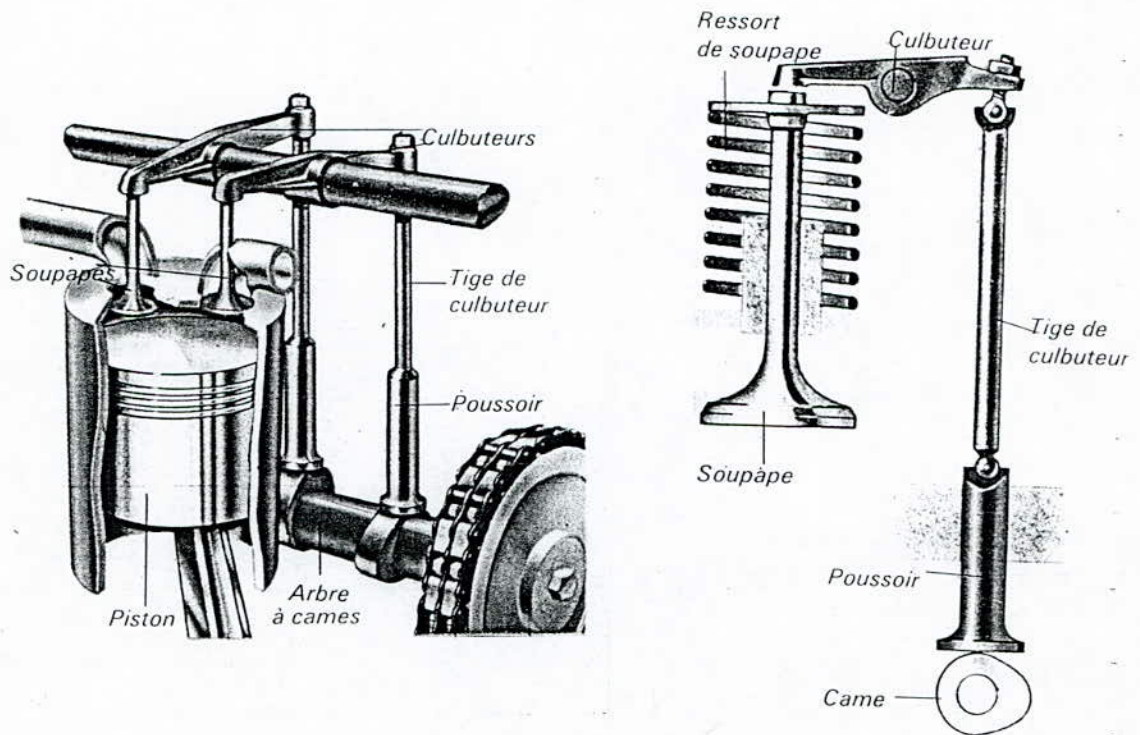


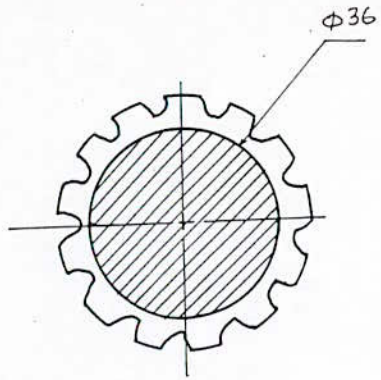
Fig 1: Fonctionnement de l'arbre à cames.

I.3- Sollicitations mécaniques de l'arbre à came [3], [4], [5]:

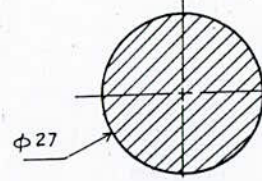
La pièce est exposée à des efforts (moment de torsion, moment de flexion) et doit assurer un bon contact entre les cames et les poussoirs, d'autant plus que la pièce subit un frottement entre les cames et les poussoirs.

En résumé, la pièce doit assurer les exigences suivantes

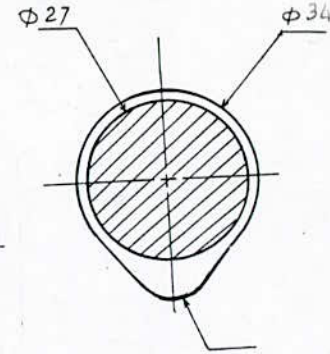
- Une bonne résistance à l'usure au niveau des cames.
- Une bonne résistance à la flexion rotative et la torsion.



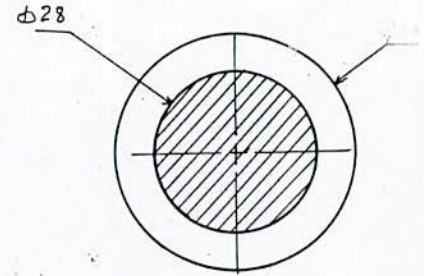
Coupe D-D



Coupe C-C

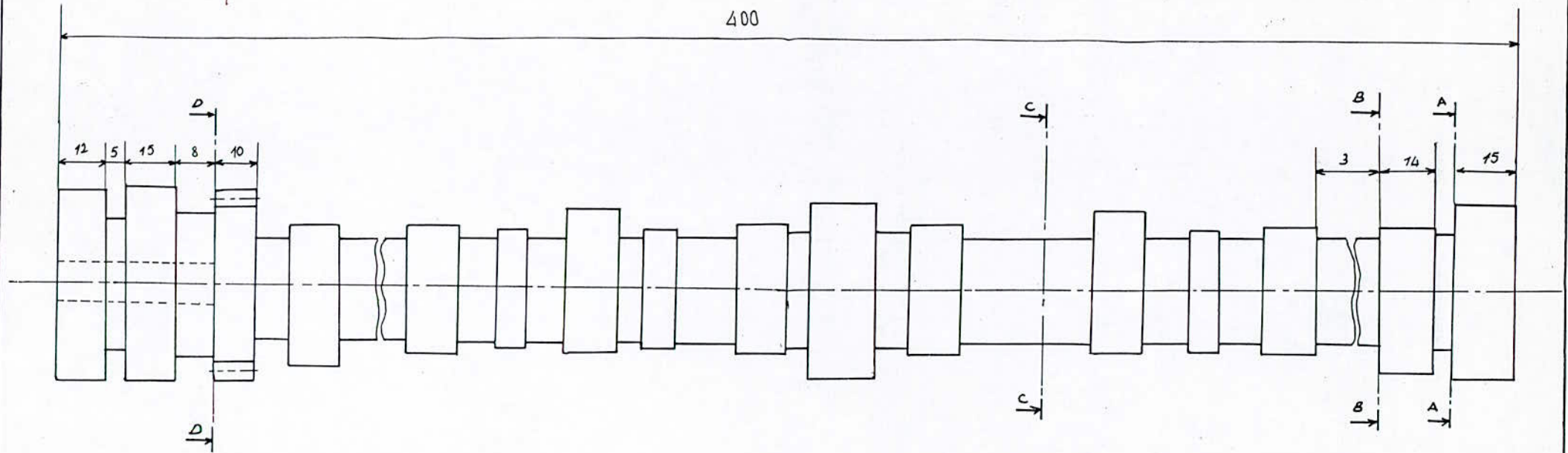


Coupe B-B



Coupe A-A

400



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE			
Echelle	Masse	ARBRE A CAMES	ENP Dept. Metallurgie
1/2			
Etudiant	M. SEKHOU		
Promoteur	E-SALHI		

Chapitre II

CHAPITRE II: PARTIE EXPERIMENTALE.

Dans cette partie, nous allons présenter succinctement les principales techniques qui permettent de connaître le matériau de la pièce et par suite nous allons, caractériser les principaux traitements qui ont été effectués.

Les différentes techniques expérimentales utilisées dans cette expertise sont:

- 1- Préparation micrographique des échantillons
- 2- Analyse chimique
- 3- Analyse métallographique quantitative et qualitative
- 4- Mesures de la dureté et de la microdureté.

2.1- Préparation micrographique des échantillons:

2.1.1- Prélèvement des échantillons:

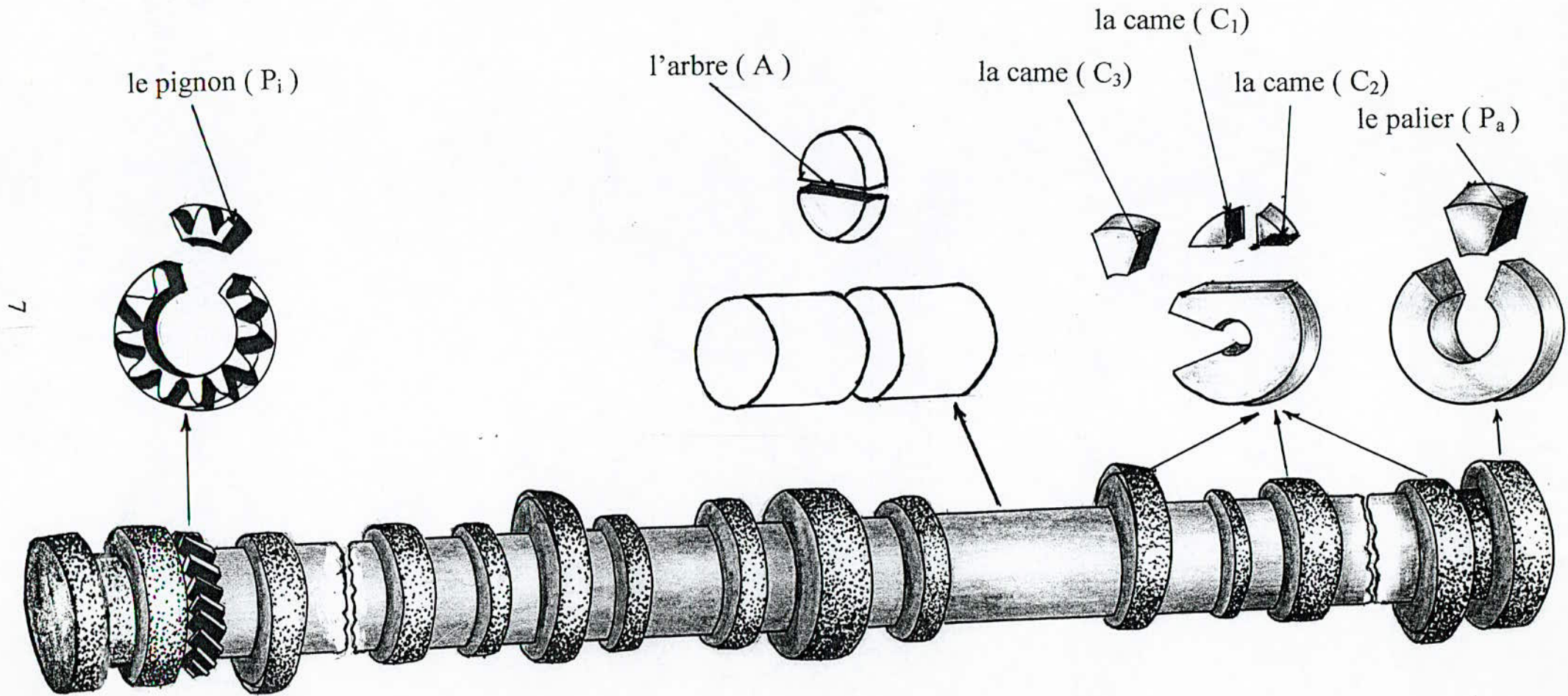
Les échantillons à analyser ont été coupés longitudinalement et transversalement afin de voir l'évolution de la structure dans les deux directions, notre choix s'est porté sur les parties fonctionnelles de la pièce comme l'indique la figure 2

Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une scie à métaux et d'une tronçonneuse avec arrosage de lubrifiant.

Le découpage est effectué soigneusement, afin d'éviter la modification de la structure.

Les échantillons sont dressés puis rectifiés à la meule pour éliminer les bavures puis enrobés à chaud avec la résine.

Fig (02):Prélèvement des échantillons



2.1.2- Polissage:

Le polissage consiste à rendre la surface plane et brillante de façon à ce qu'elle ne présente aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur.

Les zones choisies sont polies à l'aide des papiers abrasifs. Les numéros de papiers utilisés sont 120, 320, 600, 1000, 1200.

Le polissage s'effectue sous la coulée d'eau.

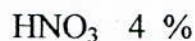
L'opération de finition permet d'obtenir une surface polie parfaite à l'aide de feutre arrosé d'une suspension d'alumine.

La surface polie doit être nettoyée soigneusement à l'eau et séchée à l'air chaud.

2.1.3- Attaque chimique

L'attaque a pour but de révéler les joints des cristaux et de différencier les constituants et les phases de l'alliage.

La méthode de l'attaque consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif de nital de composition



La durée de l'attaque est de 5 à 15 secondes à la température ambiante.

2.2- Analyse chimique:

L'analyse chimique nous renseigne sur la composition chimique de la pièce, qui a été faite au laboratoire de contrôle de l'entreprise S.N.V.I-(CVI) de Rouiba. Les méthodes utilisées dépendent des éléments à analyser:

- Analyse conductivimétrique (pour le carbone et le soufre)
- Analyse gravimétrique (pour le silicium)
- Analyse volumétrique (pour le phosphore et le chrome)
- Analyse spectrophotométrique (pour le manganèse)

Le principe de chaque méthode est expliqué dans l'annexe

2.3- Etude métallographique quantitative et qualitative [6], [7]:

Pour caractériser de manière précise l'état de la pièce et connaître son évolution ou son comportement, nous devons maîtriser son état structural d'une part et déterminer les relations existantes entre les paramètres de la structure, et les grandeurs mécaniques, physiques et chimiques d'autre part.

Après la préparation micrographique des échantillons (prélèvement, polissage, l'attaque chimique) et l'observation au microscope optique de marque ZEISS on effectue la prise des photos. Cette dernière est effectuée pour chaque échantillon sur plusieurs plages à des grossissements différents afin de bien procéder à l'expertise.

Les mesures de la métallographie quantitative sont de nature statistique. On suppose implicitement que le matériau étudié présente un large domaine dans lequel la structure est répétitive.

Dans cette étude nous avons utilisé la méthode du comptage manuelle pour calculer le taux de forme (sphéroïdisation), fraction volumique des phases et la taille moyenne du graphite.

2.3.1- Analyse de forme:

La forme est analysée par le taux de sphéroïdisation $T_{(s)}$. Ce taux est défini par le rapport

$$T_{(s)} \% = \frac{N_s}{N} \times 100$$

T_s : taux de sphéroïdisation

N_s : Nombre de particules de forme sphérique dans la photo

N : Nombre total de particules dans la photo.

Cette mesure, est prise sur six photos d'échantillons non attaqués où seul le graphite est apparent.

Un constituant est considéré sphéroïdal si son T_s (%) est supérieur à 80 %.

2.3.2- Fraction volumique des phases:

Pour calculer le taux de la ferrite et du graphite, on a utilisé la méthode de comptage systématique, qui consiste à superposer, sur la photographie à analyser, un papier calque sur lequel on trace une grille du réseau carré, les dimensions de la maille du réseau dépendent de l'agrandissement de la photographie (dans notre cas la grille est de dimension $5 * 5 \text{ mm}^2$)

Les fractions volumiques de la ferrite et du graphite sont mesurées par le calcul du nombre d'intersections de la grille situées sur cette phase, divisé par le nombre total d'intersections de la grille fig 3

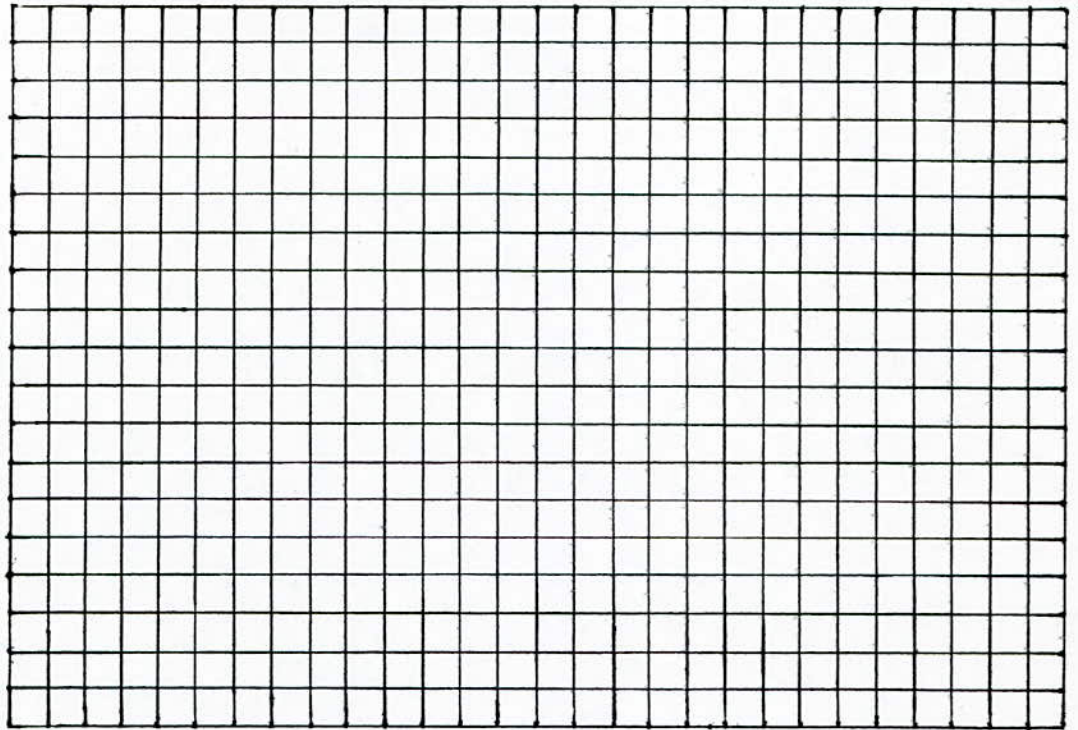


Fig 3 : La grille utilisée au comptage du taux de phase (ferrite, graphite).

La fraction volumique de la perlite se déduit à partir de la fraction volumique de la ferrite et du graphite

2.3.3- Analyse de la taille:

On mesure sur des photos d'échantillons non attaqués où seul le graphite est apparent. Les photos représentent différentes plages pour chaque échantillon.

La grille est mise sur la photo. On mesure, les lignes d'intersection, des lignes de la grille sur les grains de graphite. Les mesures des dimensions des nodules ont été faites comme suit:

❖ Soit d_i les diamètres moyens mesurés dans les intervalles suivants : 0 - 1; 1 - 2; 2 - 3; 3 - 4; 4 - 5; 5 - 6; 6 - 7; 7 - 8.

❖ Soit n_i les nombres des particules dans les intervalles considérés.

La taille moyenne des nodules du graphite est calculée par:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^8 n_i d_i}{\sum_{i=1}^8 n_i}$$

Le calcul de l'écart type σ de cette distribution est nécessaire pour la connaissance de la concentration de cette distribution.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 n_i (d_i - \bar{d})^2}{\sum_{i=1}^8 n_i}}$$

σ : écart type

n_i : nombre de particules dans l'intervalle [i - 1, i]

\bar{d} : la taille moyenne des nodules

d_i : diamètre moyen des nodules dans l'intervalle [i - 1, i]

2.4- Essais de dureté et microdureté [8], [9], [10]:

2.4.1- 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 du métal est d'autant plus grande que la pénétration du corps est plus faible. L'essai consiste à exercer sur un poinçon de forme (sphérique, conique ou pyramidal) une force constante pendant un temps donné, une empreinte de diamètre « D » apparaît sur le métal.

La dureté est donc évaluée en fonction de la surface ou de la profondeur de l'empreinte laissée par le poinçon.

Essai de ROCKWELL .

L'essai consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement de la profondeur de pénétration .

L'essai à été effectué conformément à la norme AFNOR. A 03 - 153 / 154 sur un duromètre de type (LORT 240) au laboratoire du département de métallurgie de l'ENP (l'Ecole Nationale Polytechnique).

Cet appareil permet la réalisation des deux types d 'essais classiques

- Essai Brinell (conversion automatique en vickers)
- Essai Rockwell (conversion automatique en vickers)

2.4.2- Essai de microdureté:

Le microduromètre permet de mesurer les duretés des phases d'une structure, il permet aussi de mesurer la dureté superficielle, sur les couches de quelques micromètres d'épaisseur. On utilise dans le microduromètre la mesure de dureté Vickers.

C'est en effet la méthode qui peut être utilisée dans la totalité du domaine de mesure.

La charge est choisie de telle sorte que l'empreinte soit mesurée avec la plus courte marge d'erreur d'appréciation.

Les essais de microdureté ont été effectués sur un microduromètre de type ZEISS, au laboratoire de métallurgie de l'ERMA (Entreprise de Rénovation des Matériaux Aéronautique).

L'essai se compose d'une mise en charge de 5 à 8 secondes et du maintien de la charge sur l'échantillon pendant 10 à 15 secondes. Après l'application de la charge, le pénétrateur laisse une empreinte en losange, les diagonales de l'empreinte d_1 et d_2 sont mesurés à l'aide d'une règle graduée située sur l'oculaire.

On calcule la diagonale moyenne D:

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

La lecture de la microdureté se fait directement sur des tables faisant correspondre la diagonale moyenne D à la microdureté HV, suivant la charge appliquée.

Chapitre III

CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSIONS:

3.1- L'analyse chimique:

Le résultat de l'analyse chimique est présenté dans le tableau 1:

Cette analyse montre que le matériau de l'arbre à cames à expertiser est une fonte grise due à la présence d'une teneur élevée en carbone (C= 3.35 %) et à la présence d'une concentration importante en silicium (élément graphitisant, Si = 2.74 %).

Elément	C	Si	Mn	Mg	P	Cr	S
% en masse	3.35	2.74	0.4	0.0055	0.0138	0.1	0.008<

Tableau (1) : Résultat de l'analyse chimique de l'arbre à cames.

3.2- Observation micrographique:

3.2.1- Les cames et les paliers:

Les photos micrographiques prises sur les échantillons de la came et le palier ne présentent pas une unité microstructurale homogène, généralement les micrographies des échantillons mettent en évidence trois zones distinctes comme le représente la figure 04).

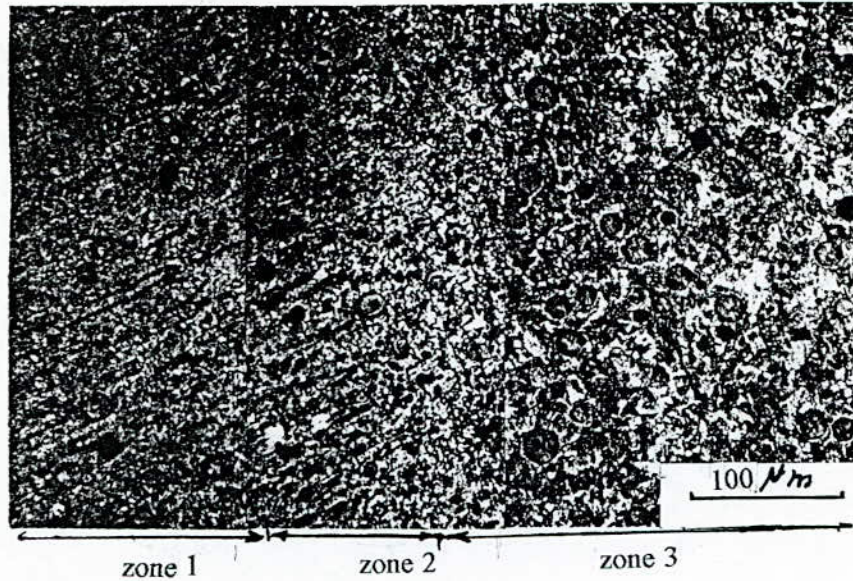


Fig 04 Micrographie de la came

Zone 1: Cette zone montre la présence des aiguilles très fines de martensite avec certaines plages claires qui ne peuvent être que la ferrite non transformée et l'austénite résiduelle, ainsi que des nodules du graphite comme montrent la figure (5).

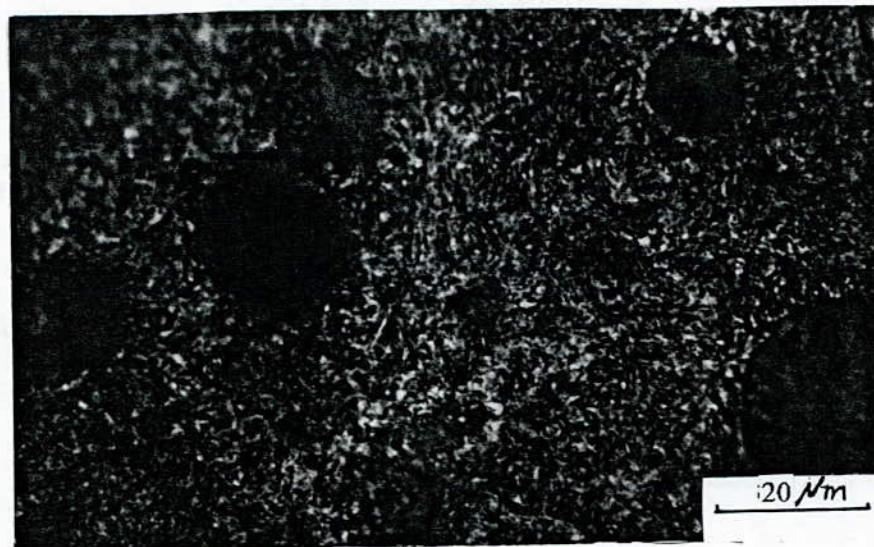


fig 5-A la came (C₁)

Fig 05 : Micrographies de la came (C₁, C₂, C₃) et le palier (P_a)

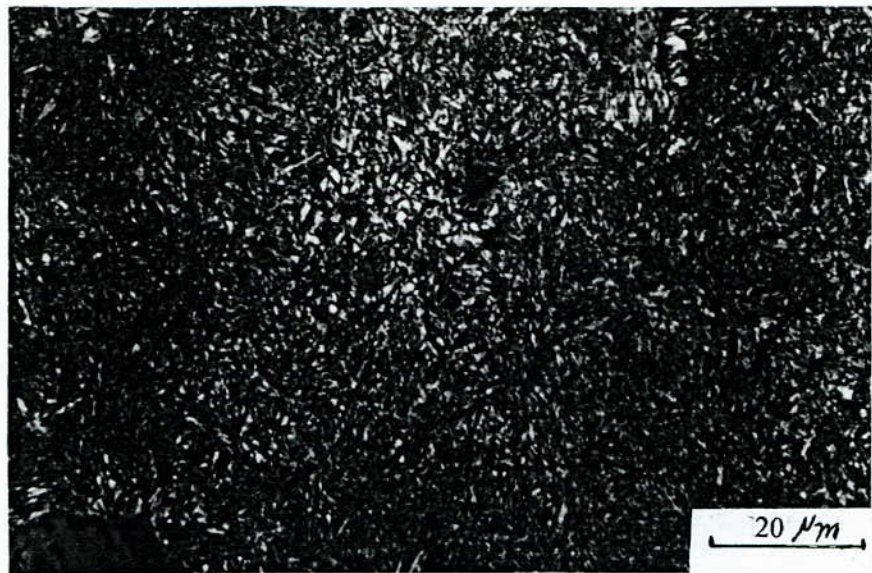


fig 5-B la came C₂

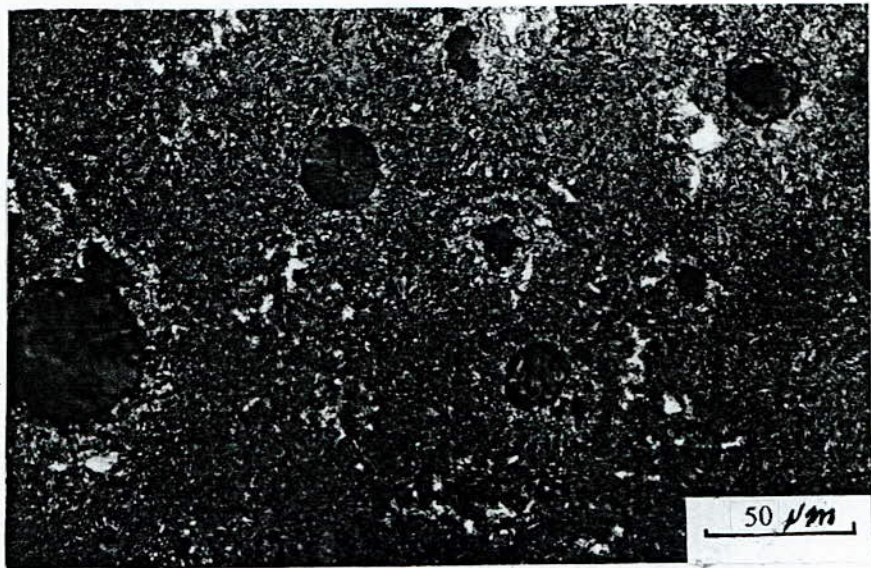


fig 5-C la came C₃

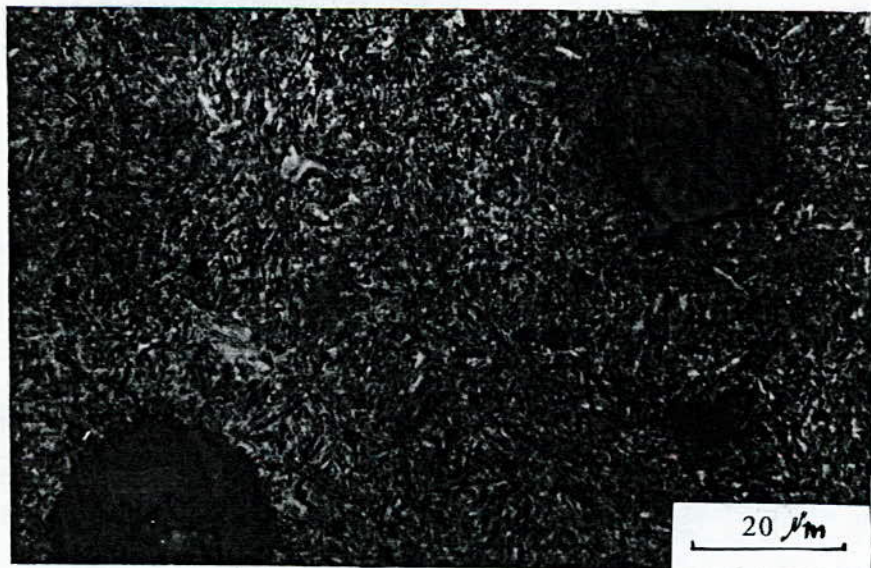
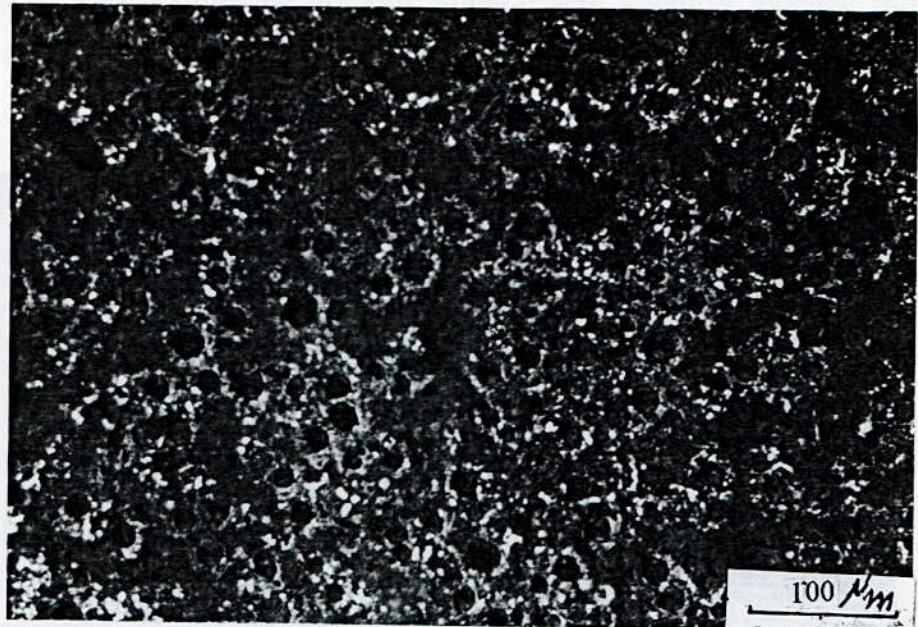
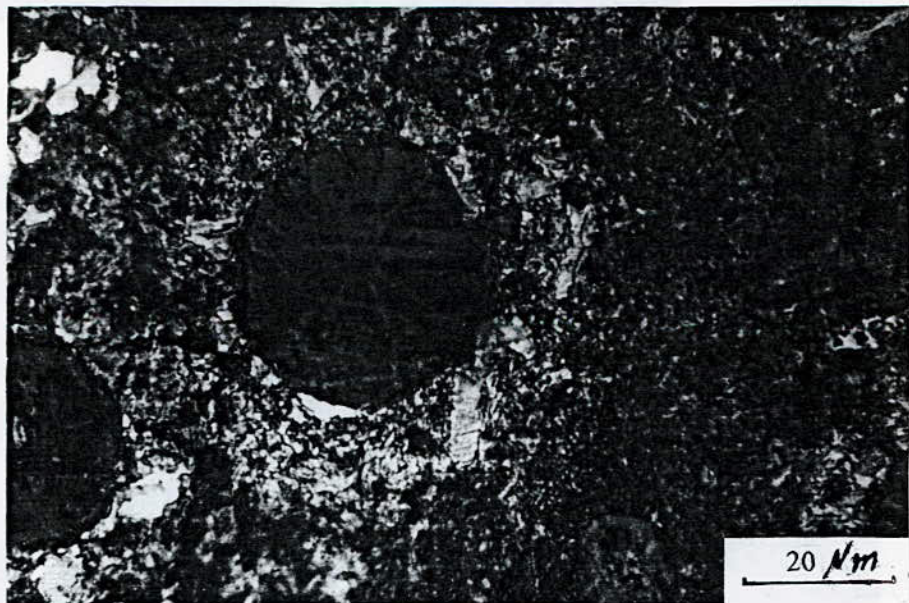


fig 5-D palier (P_a)

Zone 2: La structure de cette zone est un mélange de la perlite qui apparaît en gris, de la ferrite qui apparaît en claires, des nodules de graphites apparaissent sombres, et des aiguilles très fines de la martensite comme montre la figure 6 .



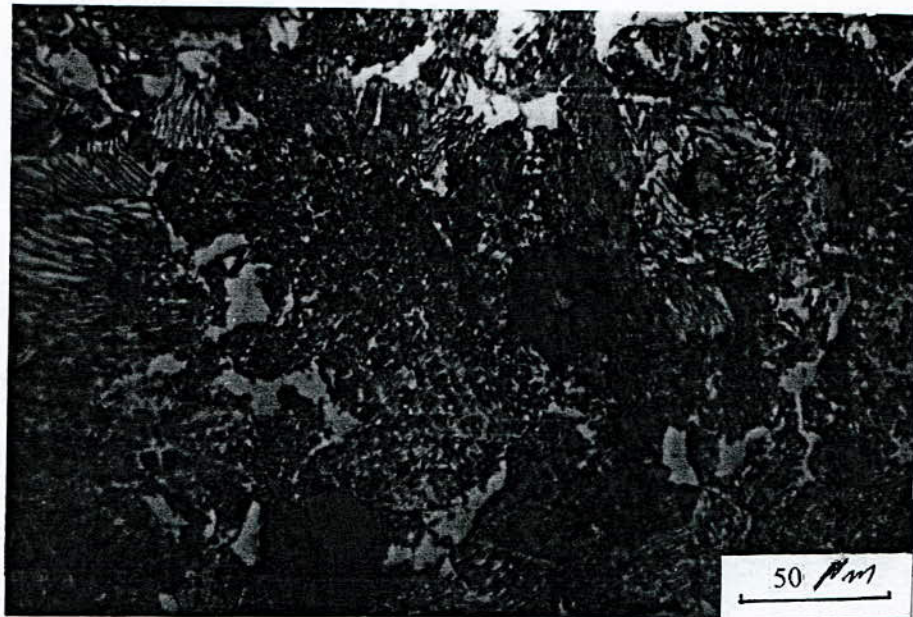
la came (C₁)



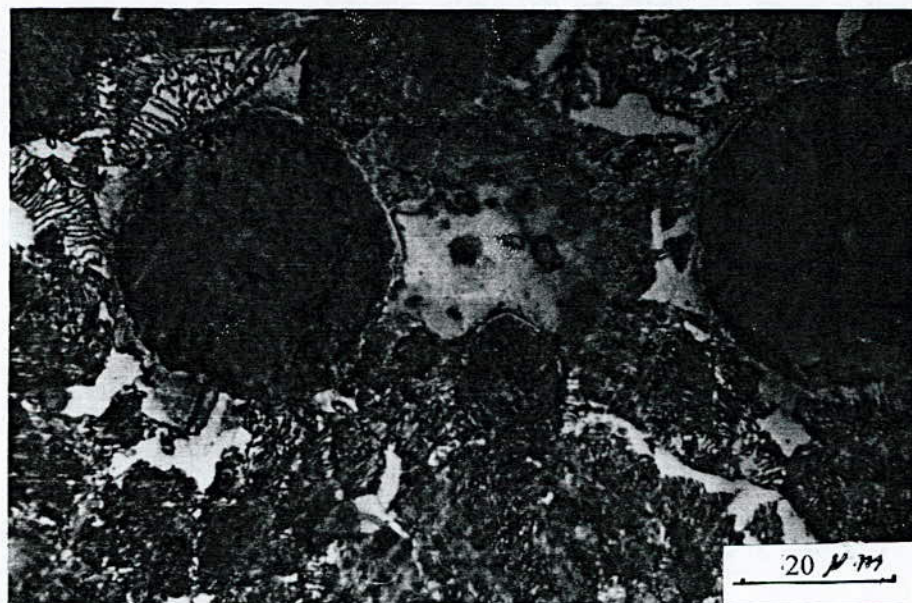
palier (P_a)

Fig 06 : Micrographies de la came (C₁) et du palier (P_a) en zone 2

Zone 3: La structure de cette zone montre la présence des agrégats en perlite avec certaines plages en ferrite et nodules de graphite, la perlite apparaît grise, par contre la ferrite en claire. Les nodules de graphite apparaissent sombres, comme montrent la figure 07



la came (C₁)



palier (Pa)

Fig 07 : Micrographies de la came (C₁) et du palier (P_a) en zone 3

Vu que la structure martensitique n'existe que sur une couche de quelques millimètres de la came et le palier, cette couche de profondeur homogène pour toutes les cames et tous les paliers. Ce qui permet de constater que la surface a subi un traitement localisé effectué par trempe à haute fréquence.

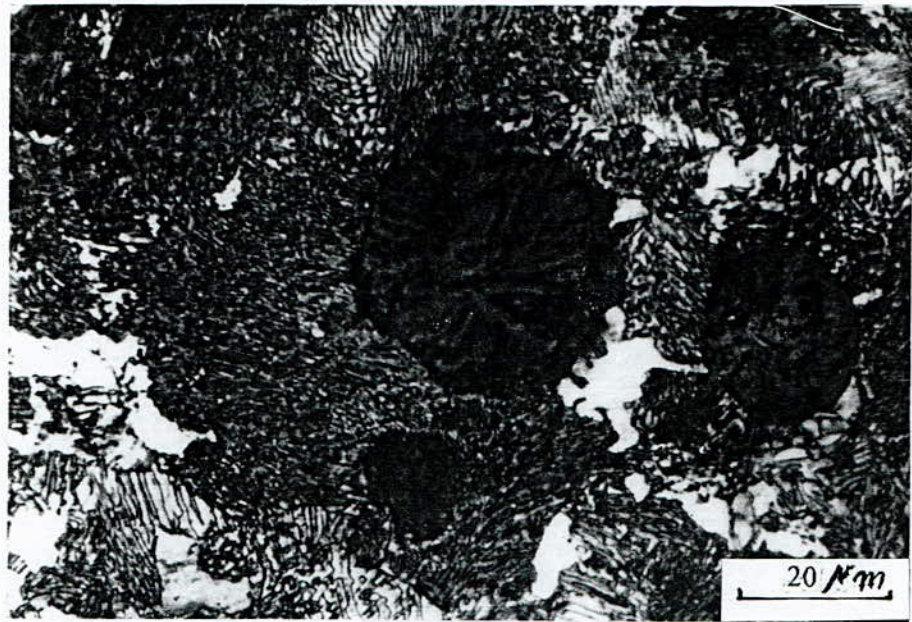
Mais généralement dans l'industrie la trempe est suivie par un revenu, pour atténuer l'effet néfaste de la trempe, le revenu est effectué à basse température entre 150 et 250 °C.

Les plages claires comme montre la figure (05.c) autour des nodules existent dans une structure de trempe, qui sont identiques aux plages claires sur une structure perlito-ferritique. Nous ne pouvons supposer que ces plages claires soient une austénite, car le chauffage d'une trempe à haute fréquence provoque une surfusion, ce qui à pour conséquence une élévation de la température de transformation de la ferrite en austénite. Le temps de chauffage n'est pas suffisant pour dissoudre la ferrite, ainsi la structure que nous obtenons après la trempe à haute fréquence, ne peut être que la martensite, plus l'austénite résiduelle, de toute plage anciennement perlitique et les plages anciennement ferritique restent à majeure partie ferritique.

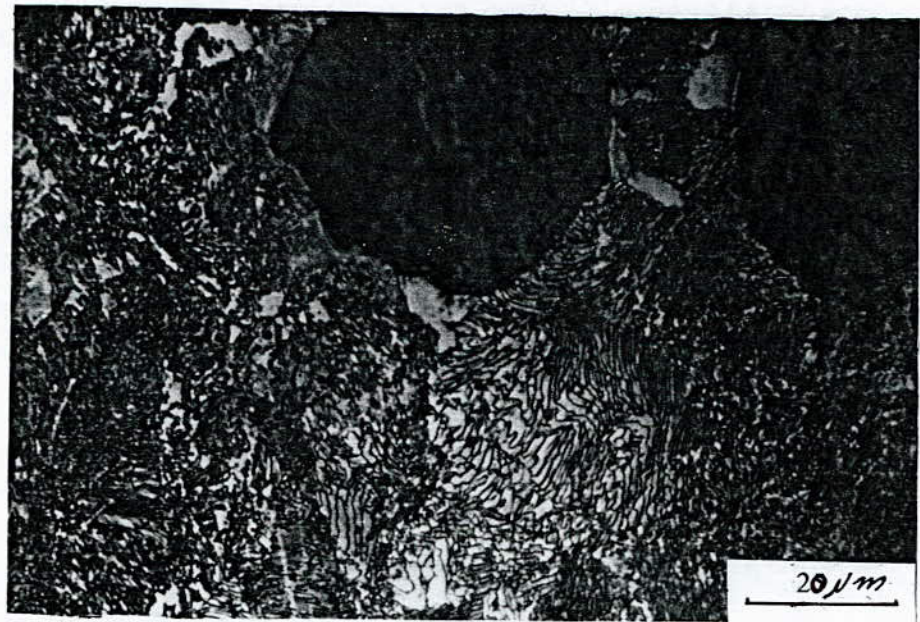
3.2.2- L'arbre et le pignon:

Les photos micrographiques de l'arbre et du pignon correspondent à une microstructure homogène.

La figure 08 met en évidence des structures semblables à celles observées en zone 3. On distingue clairement les couches alternées de ferrite et de cémentite, cette structure lamellaire, apparaît en gris et la ferrite en claire par contre les nodules de graphite apparaissent sombres.



l'arbre (A).



le pignon (P_i).

Fig 08 : Micrographies de l'arbre (A) et du pignon (P_i)

L'analyse métallographique a mis en évidence:

* que le matériau est une fonte et montre que le graphite est réparti dans la matrice sous forme sphéroïdale

* une structure martensitique avec la présence d'une certaine plage claire au niveau d'une couche superficielle sur quelques millimètre de profondeur sur les cames et sur les paliers.

* une structure perlitique avec des plages claires de ferrite et des nodules de graphite au niveau de l'arbre, du pignon et du cœur de la came et du palier.

* La profondeur de couche martensitique est homogène pour chaque came et chaque palier. Donc cette couche a subi un traitement localisé de durcissement superficiel par trempe à haute fréquence.

3.3- Analyse quantitative et qualitative:

3.3.1- Taux de forme:

Le taux de forme (sphéroïdisation), $T_s = 88 \%$ confirme le résultat métallographique, donc la fonte utilisée pour la fabrication de l'arbre à cames est une fonte grise à graphite sphéroïdal.

3.3.2- Fractions volumiques:

Les fractions volumiques mesurées sont présentés dans le tableau 2

Les mesures sont prises sur 3 plages différentes de chaque échantillon

	Le cœur			La couche superficielle.		
	Graphite	Ferrite	Perlite	Graphite	Martensite + α + γ résiduelle	
La came	C ₁	12,55	9,32	78,13	11,05	88,95
	C ₂	12,40	9,35	78,25	11,25	88,75
	C ₃	11,82	9,20	78,98	12,13	87,87
Le palier	P _a	12,08	9,4	78,52	12,30	87,70
L'arbre	A	11,53	13,17	75,3	-	-
Le pignon	P _i	11,43	12,40	76,17	-	-

Tableau 2 : La fraction volumique mesurée pour chaque échantillon.

On remarque que l'analyse quantitative concorde avec l'observation micrographique.

- Le taux de la martensite varie entre 87,70 et 88,95 % au niveau d'une couche superficielle pour les cames et les paliers
- Le taux du graphite varie légèrement entre tous les échantillons (11.05 - 12.53 %).
- Le taux de la perlite varie entre 76.17 et 78.92 % pour le reste de toute la pièce.

3.3.3- Résultat de la taille moyenne du graphite:

La distribution de la taille moyenne du graphite pour tous les échantillons est présentée sur le tableau 3 et la figure 9

La taille moyenne des nodules de graphite (\bar{d}) varie légèrement entre les échantillons. Mais on remarque une forte distribution (n_i) pour les classes faibles comme présente la figure 9, il y a une forte concentration de la taille moyenne entre 0 - 4 mm.

les échantillons L_i (mm)	La came			Palier	L'arbre	Pignon
	$n_i (C_1)$	$n_i (C_2)$	$n_i (C_3)$	$n_i (P_a)$	$n_i (A)$	$n_i (P_i)$
0 - 1	200	185	190	180	150	145
1 - 2	143	175	173	170	130	140
2 - 3	70	70	60	58	63	50
3 - 4	34	30	25	23	25	30
4 - 5	18	25	27	17	14	11
5 - 6	2	4	3	2	4	5
6 - 7	1	2	1	1	2	1
7 - 8	1	1	0	0	0	0
Σn_i	469	492	479	451	388	382
\bar{d} (mm)	1,52	1,59	1,53	1,47	1,57	156
\bar{d} (μm)	7,6	7,95	7,65	7,35	7,85	7,8
σ	1,19	1,23	1,18	1,09	1,19	1,16

Tableau 3 : La taille moyenne du graphite.

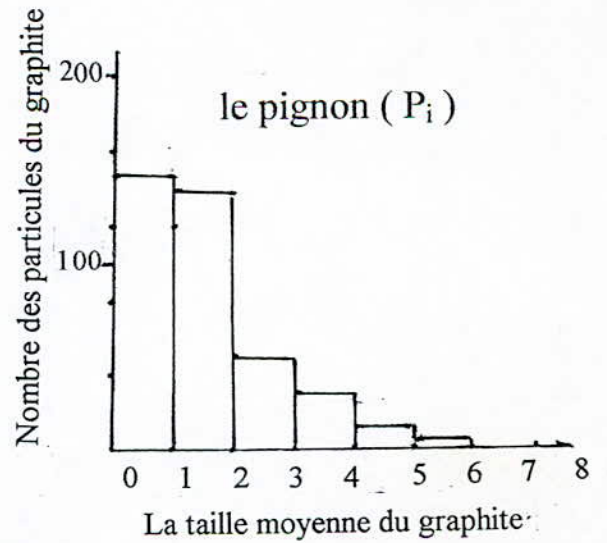
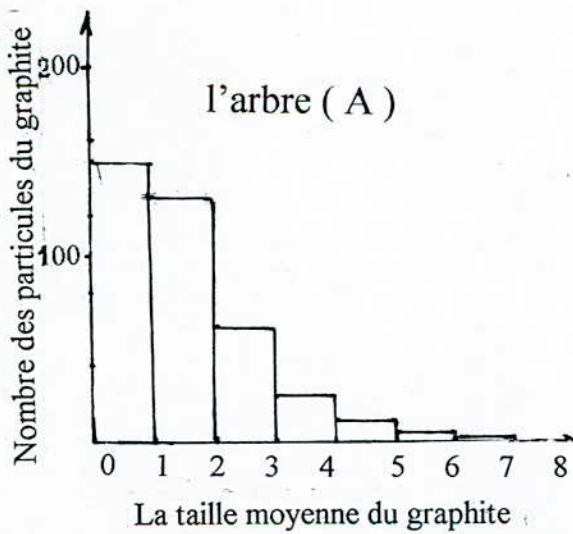
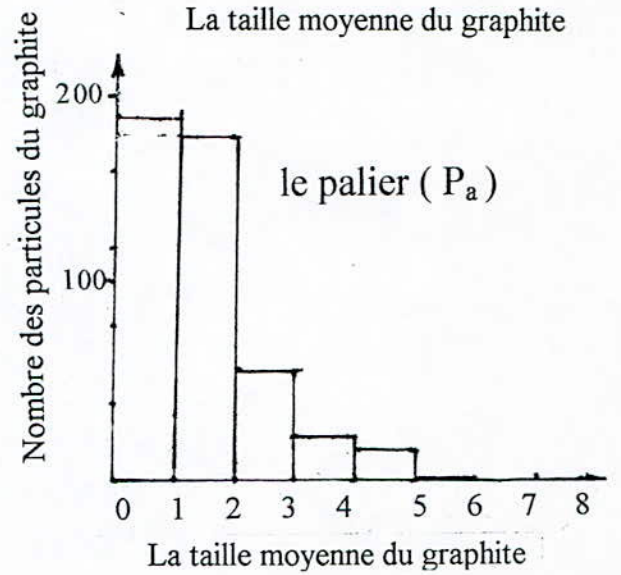
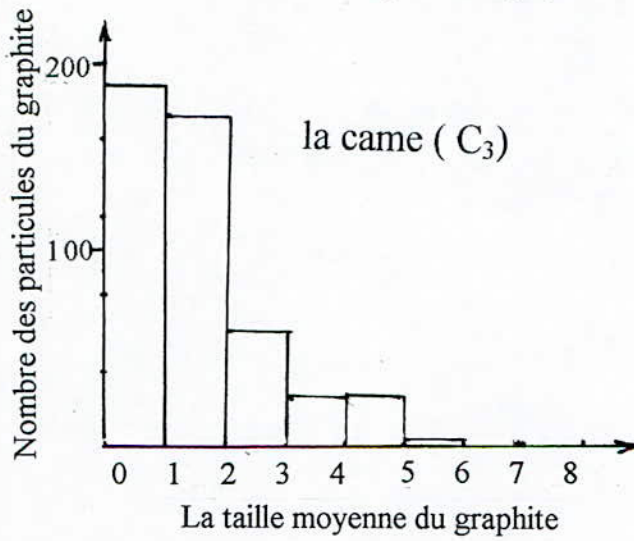
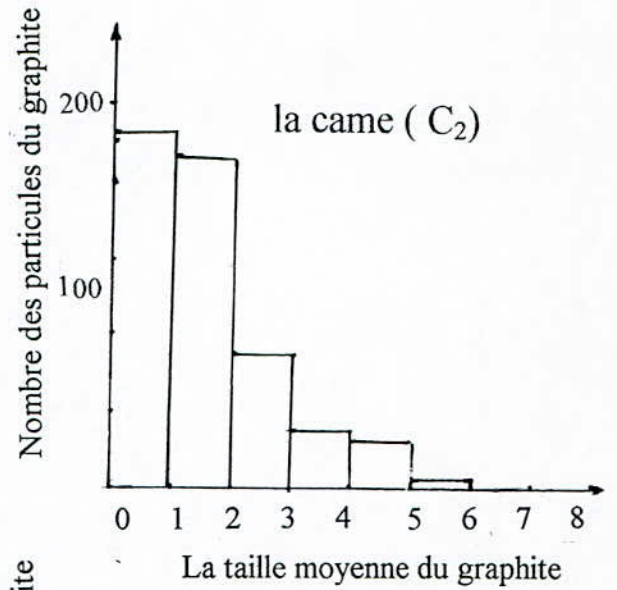
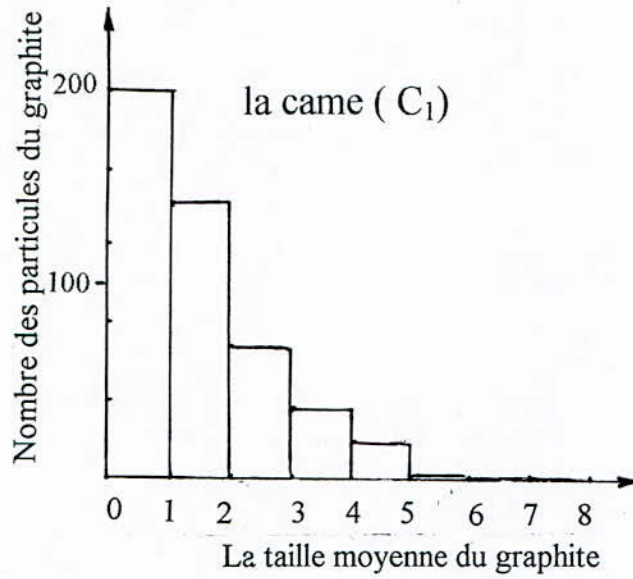


Fig 09 : Représentation des histogrammes de la distribution de la taille moyenne du graphite

3.4- Essai de dureté et de microdureté:

3.4.1- Essai de dureté:

Le tableau 4 rassemble les différentes valeurs de la dureté moyenne obtenues après plusieurs mesures pour chaque échantillon.

On remarque au niveau de la couche superficielle pour les échantillons de la came et le palier que la dureté varie entre 52 - 49 HRC (560 - 530 HV). Mais la dureté varie entre 23 - 27 HRC (290 - 310 HV) pour le reste de la pièce il y a grande différence de dureté entre les couches superficielles et le cœur de la came et le palier, cette différence est due à l'existence des contraintes de compression au niveau des couches superficielles.

		Le cœur		La couche superficielle	
		HRC	HV	HRC	HV
La came	C ₁	27	310	52	560
	C ₂	26	300	51	550
	C ₃	24	290	49	535
Le palier	P _a	23	285	50	545
L'arbre	A	24	290	-	-
Le pignon	P ₁	26	300	-	-

Tableau 4: Résultats de l'essai de dureté.

3.4.2- Essai de Microdureté:

Les mesures et filiations de la microdureté sont présentées dans les tableaux suivants:

La charge utilisée varie entre 400 et 600 g.

Distance(μm)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
Dureté(HV)	586	587	582	573	560	550	535	520	500

5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000
480	460	410	320	308	315	305

Tableau 5: Résultat de l'essai de microdureté de la came (C_1)

Distance(μm)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
Dureté(HV)	563	568	590	562	553	541	510	490	465

5000	5500	6000	6500	7000
460	390	356	318	308

Tableau 6 : Résultat de l'essai de microdureté de la came (C_2)

Distance(μm)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
Dureté(HV)	570	575	560	550	535	515	439	368	343

5000	5500	6000	6500
321	320	300	309

Tableau 7: Résultat de l'essai de microdureté de la came (C_3)

Distance (μm)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
Dureté (HV)	575	565	560	552	542	530	450	395

4500	5000	5500	6000
325	310	305	311

Tableau 8 : Résultat de l'essai de microdureté du palier (P_a)

L'essai de microdureté confirme les observations micrographiques et l'analyse quantitative et donne la dureté de chaque phase.

- la dureté de la martensite varie entre 580 et 500 HV
- la dureté de la perlite varie entre 300 et 340 HV.

La filiation de microdureté permet de calculer la profondeur de trempe et voir l'évolution de la dureté de la couche superficielle jusqu'au cœur de la pièce, comme représente la figure 10.

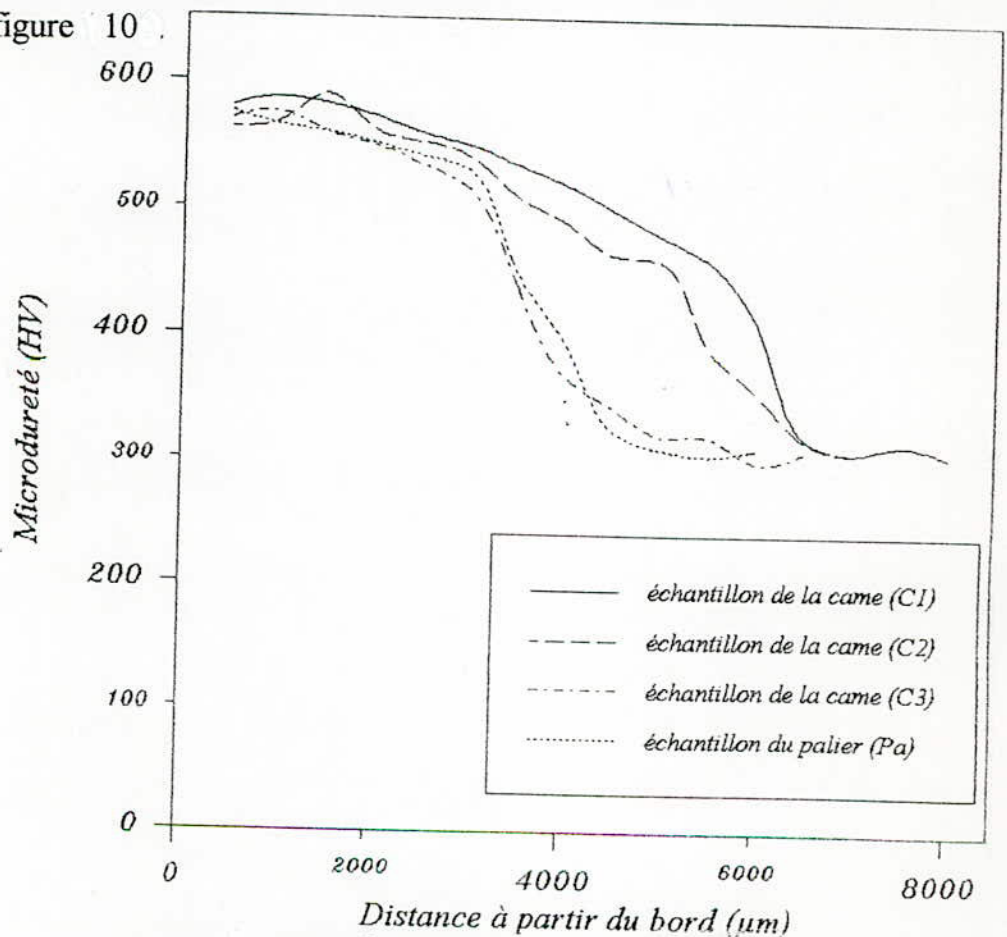


Fig 10 : Filiation de la microdureté de la came (C_1, C_2, C_3) et du palier (P_a).

La profondeur de trempe varie entre 4 et 5 mm pour les cames C_1 et C_2 et 3 - 3.5 mm pour la came C_3 et le palier P .

La forme de la filiation montre l'existence d'une zone de transition (zone 2) correspondant au passage des contraintes de compression en surface à des contraintes d'extension (traction) au cœur. Cette zone ayant de meilleures propriétés mécaniques pour les cames C_1 et C_2 : comme le montre la figure 10, que celles de la came C_3 et le palier P_a .

Les valeurs de la microdureté sont devenues constantes à partir d'une profondeur de 6 mm pour les cames C_1 et C_2 , et de 4 mm pour la came C_3 et le palier.

Chapitre IV

CHAPITRE IV: ETUDE DU MATERIAU DE L'ARBRE

A CAMES

Les fontes grises à graphite sphéroïdal, sont des fontes grises où le graphite est obtenu lors de l'élaboration sous forme sphéroïdale. Leurs différentes propriétés et caractéristiques mécaniques plus proche de celle de l'acier.

4.1- Elaboration [8], [10], [11]:

Les fontes grises à graphite sphéroïdal peuvent être élaborées dans des fours généralement utilisés en fonderie, la composition chimique moyenne de la fonte est la suivante.

$$C = 3,2 - 3,6 \% ; \quad Si = 1,3 - 3 \%$$

$$Mn = 0,3 - 0,4 \% ; \quad P = 0,04 \%$$

Pour obtenir une fonte à graphite sphéroïdal, il faut introduire dans la fonte de base un alliage comprenant deux sortes d'éléments ayant des rôles opposés, immédiatement avant la coulée:

- Des éléments graphitisants qui provoquent la formation des sphéroïdes de graphite (exemple silicium).
- Des éléments blanchissant qui ont pour rôle d'empêcher temporairement la formation du graphite en lamelles et à donner la fonte blanche (exemple magnésium)

Actuellement, le procédé au magnésium est le seul utilisé. Le magnésium est introduit dans le bain de fonte à traiter vers 1450 °C sous plusieurs type d'alliages

4.1.1- Nickel - Magnésium:

C'est l'alliage le plus ancien; il a l'avantage d'une forte densité et qui par conséquent, entre facilement dans le métal liquide. Une basse teneur de nickel dans la fonte, ne peut pas modifier beaucoup la structure, mais normalement il tend plutôt à donner une structure perlitique; d'où l'intérêt d'utiliser le nickel, magnésium dans le cas des fontes G.S perlitiques.

4.1.2- Nickel - Magnésium - Silicium.

Le rendement en magnésium est un peu plus inférieur à celui de l'alliage précédent, il introduit un peu de silicium et moins de nickel dans la fonte, ce qui peut être avantageux pour certaines applications.

4.1.3- Fer - Silicium - Magnésium:

Ce sont les plus utilisés actuellement du fait qu'ils sont plus légers et plus économiques. En plus de cela permet l'emploi d'alliage plus dilué en magnésium, se qui donne des réactions plus calmes et ~~des~~ meilleurs rendements.

4.3- Composition chimique des fontes G.S [11], [12], [13]

Ce sont les éléments dont la présence est normale jusqu'à une certaine teneur.

- Carbone:

C'est l'élément le plus important, graphitisant, la matrice d'une fonte G.S est

hypo ou hypereutectique selon la teneur en carbone.

Le pourcentage de carbone ne peut être diminué au-dessous de 2,3 %

- *Silicium:*

Le silicium est un élément graphitisant. En quantité abondante, l'accroissement de la teneur en silicium fait durcir la ferrite et augmente la résistance à la traction mais fait baisser la résilience de la fonte.

Le silicium accroît la vitesse de solidification du carbone dans l'austénite lors de formation des sphéroides de graphite

- *Magnésium:*

C'est l'élément de base pour l'obtention du graphite sphéroïdal et blanchissant de la matrice.

Les difficultés d'introduction du magnésium à cause de sa densité $1,74 \text{ g/cm}^3$, sa tendance à l'évaporation (température d'ébullition 1100 °C) et son affinité pour l'oxygène.

- *Manganèse*

Le manganèse est un élément carburigène et blanchissant, ce corps pratiquement présent dans toutes les fontes, il fixe le soufre sous forme MnS. La structure perlitique accroît avec le titre en manganèse, il durcit la fonte et baisse sa résistance. Il y a lieu de prévoir un pourcentage relativement bas < 0.4 .

- Soufre:

La présence de soufre a pour inconvénient d'augmenter la consommation de magnésium MgS, considéré comme inclusion néfaste et fragilise le matériau.

- Phosphore:

Le phosphore est un élément graphitisant, il augmente considérablement la coulabilité, fragilise les joints des grains et provoque une rupture intergranulaire. Le phosphore forme des phosphures qui abaissent les propriétés mécaniques du métal.

- Chrome:

Le chrome est un élément blanchissant, carburigène et alphagène. Il favorise la pénétration de trempe et augmente considérablement l'élasticité. Il affine la structure perlitique mais sa présence en grande quantité, peut avoir un effet blanchissant et fragilisant

Impuretés nocives [11]:

Certains éléments peuvent détruire la forme sphéroïdale. Le graphite apparaît sous forme des nodules déchiquetées éventuellement en pseudo-lamelles ou lamelles.

Les plus nocifs sont le plomb, le Bismuth, et le tellure qui agissent à très faible teneurs (0,003 à 0,05 %). Les éléments antimoine, titane, arsenic, sont nocifs à des doses plus élevées (0,05 - 0,1 %) l'Aluminium n'est nocif qu'en forte teneur (\cong 1%)

4.4- Mécanisme de sphéroidisation du graphite [11], [12]:

Les germes de graphite sphéroïdal prennent naissance dans le liquide sursaturé en carbone, mais en raison de l'intense surfusion et du retard à la cristallisation dû à l'action combinée du Mg et de Si d'inoculation, ils s'enrobent immédiatement d'austénite.

Le mécanisme de cristallisation du graphite sphéroïdal se passe en deux opérations; germination du graphite suivie de la croissance des sphéroïdes.

Il existe différentes théories expliquant ce mécanisme.

Nous nous limitons à citer la théorie de C.T.I.F (Centre Technique des Industries de la fonderie), selon cette théorie, vérifiée par l'expérience, le graphite se formerait après l'inoculation au ferro- silicium, des cristaux transitoires de carbures de silicium, dans des zones riches en silicium de la fonte liquide.

Les plaquettes de carbure de silicium, par suite de leur dilution par le fer se décomposent en donnant des cristaux de silicium de fer et des germes de graphite sphéroïdal.

La croissance des germes de graphites dépend de deux facteurs:

- La vitesse de cristallisation du graphite V_c
- La vitesse d'apport d'atomes de carbone V_a par diffusion à travers la gaine d'austénité .

Si $V_a < V_c$, la diffusion du carbone à travers la gaine est réduite, d'où l'apport d'atomes de carbone devient symétrique dans toutes les directions. Par conséquent, la formation du graphite sphéroïdal est favorisée.

Si $V_a > V_c$, dans ce cas, la forme du graphite est déterminée par les éléments de symétrie du réseau. Comme V_c est plus grande dans le plan de base hexagonal, il en résulterait une forme lamellaire du graphite.

4.4- Structure:

Pour réaliser les caractéristiques exigées de la fonte G.S, il faut avoir une structure déterminée

- * Allongement - ductilité - résistance aux chocs ; Structure ferritique
- * Résistance à la traction - résistance à l'usure; Structure perlitique
- * Compromis entre résistance à la traction - résistance à l'usure - allongement - ductilité; Structure ferrito - perlitique.

4.5- Caractéristiques Mécaniques:

Les caractéristiques Mécaniques dépendent de la bonne sphéroidisation du graphite ainsi que de la structure qui joue un rôle déterminant.

Pour une forme bien sphéroïdale du graphite les caractéristique de résistance et d'allongement sont proches de celles de l'acier.

Ces caractéristiques peuvent varier si on passe d'une structure [8] ferritique (résistance à la traction de 40 - 55 Kg/mm², et un allongement de 24 - 15 %) à une structure perlitique (résistance à la traction de 60 - 90 Kg /mm² et un allongement de 3 - 8 %). En passant bien sûr par des valeurs intermédiaires, pour la structure ferrito-perlitique.

Chapitre V

CHAPITRE V: GAMME DE FABRICATION DE L'ARBRE

A CAMES:

L'arbre à cames est une pièce coulée en fonte, ayant une forme complexe. Pour cela on doit contrôler sa forme et ses dimensions surtout au niveau des cames, qui exigent une grande précision, qui sont déterminées soigneusement de façon à assurer un bon fonctionnement.

La gamme de fabrication de l'arbre à cames est donnée sur la figure 11 .

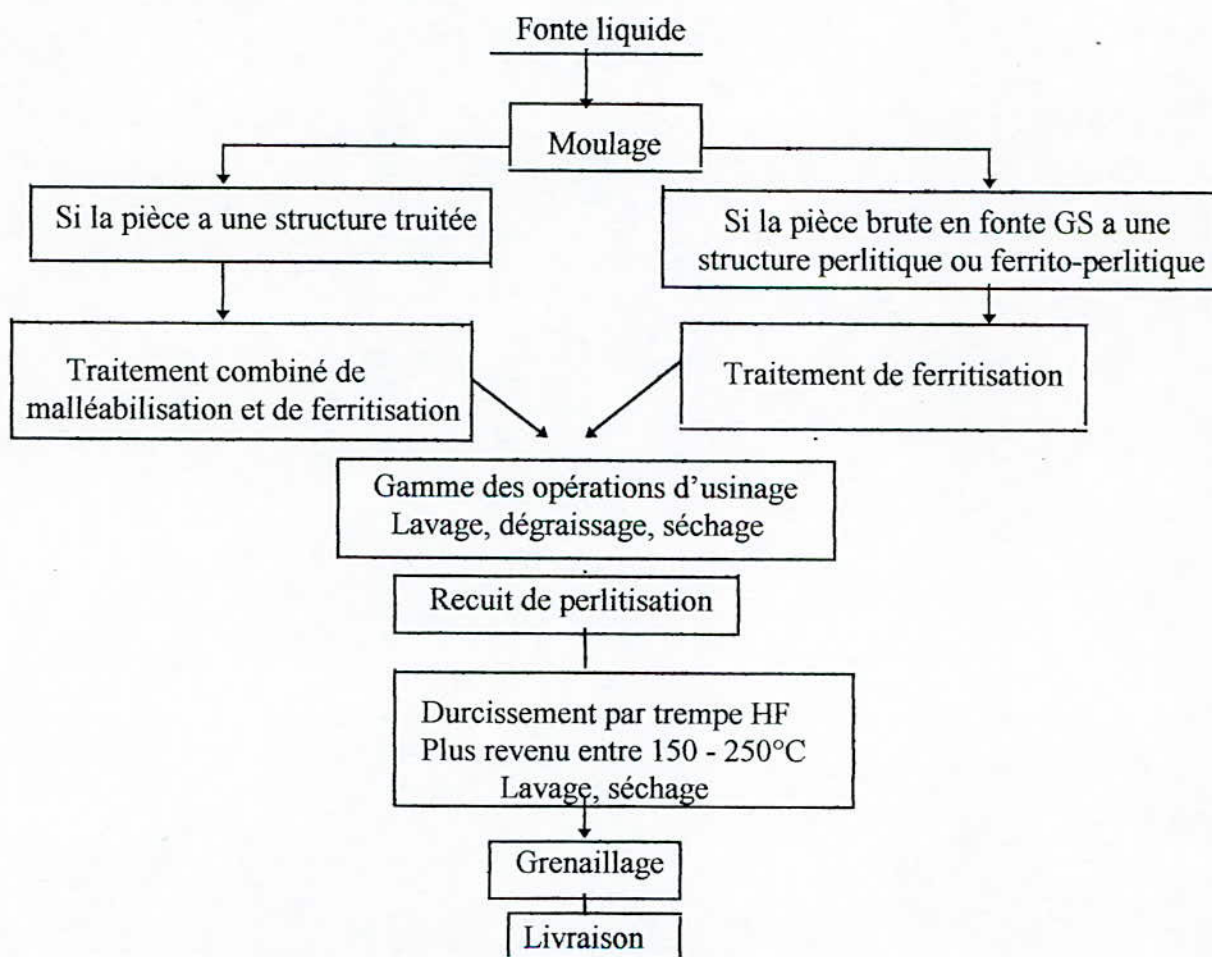


Fig11 : Schéma de la gamme de fabrication de l'arbre à came

5.1- Traitement de ferritisation [14], [10]:

Ce traitement permet d'augmenter la ductilité et la plasticité de la pièce brute, pour faciliter les opérations d'usinage ultérieures.

- Si la pièce brute de coulée en fonte GS a une structure perlitique ou ferrito - perlitique, il y a lieu d'utiliser un recuit de ferritisation.

Le cycle thermique présenté sur la fig 12 comprend un chauffage à une température comprise entre 700 - 740 °C, c'est à dire dans le domaine triphasé $\gamma + \alpha + G$ d'après la fig 13.

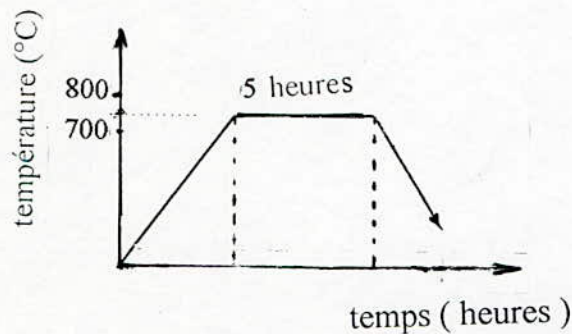


Fig 12 : Cycle thermique du recuit de ferritisation

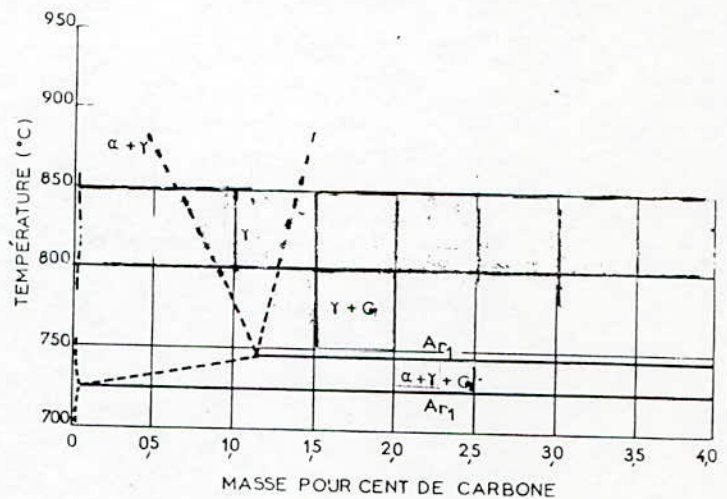
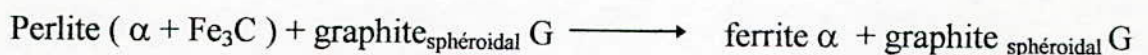


Fig 13 : Diagramme stable F-C-3% Si

Si le temps de maintien est suffisant, il y a ferritisation suivant la réaction



Puis un refroidissement très lent dans le four.

- Si la pièce brute de coulée en fonte a une structure traitée, il y a lieu d'utiliser un recuit combiné (malleabilisation et de ferritisation).

Le cycle thermique de recuit combiné se présente sur la fig 14 composé d'une opération de graphitisation de carbone et d'une ferritisation de la matrice. La graphitisation est assurée par un chauffage au-dessus de AC_3 ($980\text{ }^\circ\text{C}$), de durée de maintien 2 heures à 6 heures. Puis un refroidissement dans le four à porte fermée jusqu'à $720\text{ }^\circ\text{C}$. La ferritisation débute lors de ce refroidissement et se totalise lors du maintien à $720\text{ }^\circ\text{C}$. C'est à dire dans le domaine de la bande triphasés ($\gamma + \alpha + G$) de la figure 13. Le refroidissement est très lent jusqu'à $600\text{ }^\circ\text{C}$. Puis on finalise par un refroidissement à l'air:

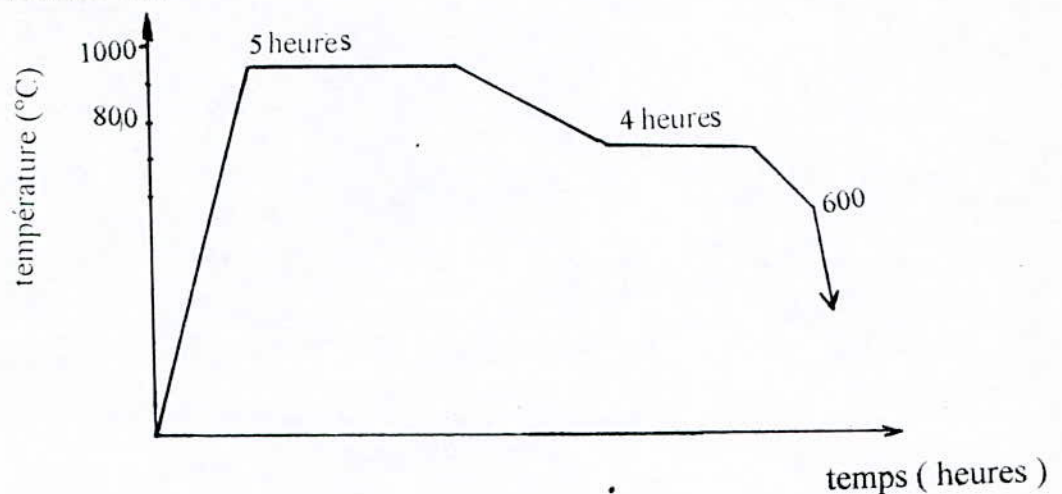


Fig . 14 : Cycle thermique du recuit combiné de malleabilisation et de ferritisation .

5.2- Gamme des opérations d'usinage [10]:

La forme et les dimensions doivent être finalisées par:

- Un tournage: pour rectifier les dimensions de l'arbre et les paliers
- Finalisation des cames à l'aide d'un tour à copier
- Une rectification en meule à grains fins, pour rectifier les profils des éléments de l'arbre et les cames
- Un taillage du pignon à l'aide d'une tailleuse d'engrenage.

5.3- Traitement de perlitisation [11], [14]:

Ce traitement a pour but d'augmenter la résistance à l'usure et la résistance mécanique et de faciliter les opérations ultérieures. Le cycle thermique de ce recuit est présenté sur la figure 15 qui comprend une austénitisation entre 900 - 1000 °C puis un maintien à cette température pendant 1 à 2 heures et enfin par refroidissement dans le four jusqu'à une température 750 - 800 °C.

Le refroidissement à travers le domaine triphasé $\gamma + \alpha + G$ est généralement rapide pour éviter la formation de la ferrite. Lorsqu'on pénètre dans le domaine de la bande triphasée, l'austénite est décomposée en perlite. Un début de ferritisation peut s'amorcer et se traduit par des auréoles blanches du graphite

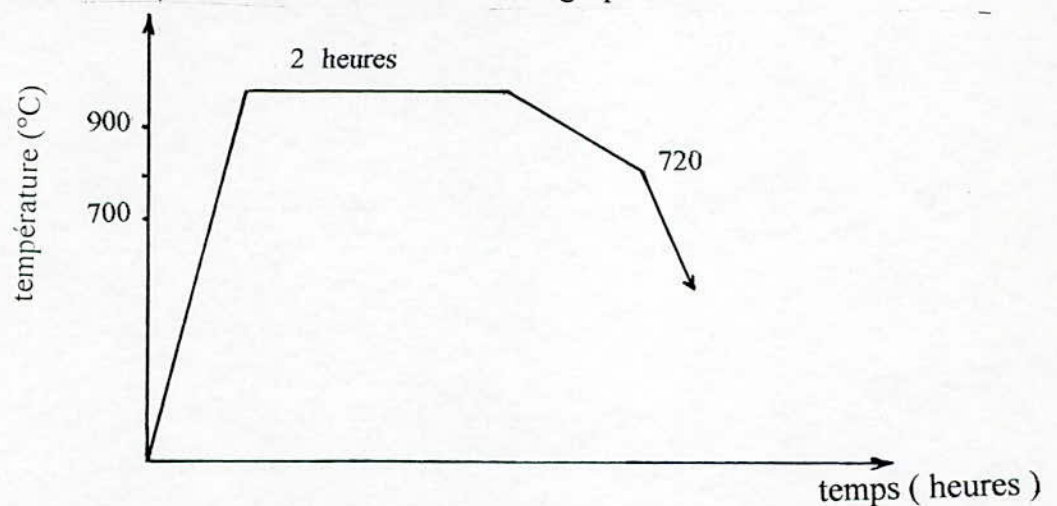


Figure 15 : Cycle thermique d'un traitement de perlitisation.

5.4- Trempe à haute fréquence [8], [14], [15]:

Une fois les opérations d'usinage sont faites, ainsi que le traitement de perlitisation, la pièce subit en dernière étape un traitement de durcissement superficiel par trempe à haute fréquence.

Le but de la trempe à haute fréquence est d'améliorer la résistance à l'usure d'une surface de quelques millimètres d'épaisseur, et l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une ténacité et une ductilité importantes au cœur.

Le cycle thermique est représenté à la figure 16 comprend une austénitisation de quelques secondes. Le refroidissement se fait au bout d'un temps très court d'austénitisation dans un milieu sévère (eau).

La trempe à haute fréquence est suivie d'un revenu entre 150 à 250 °C pendant 2 heures.

Il est recommandé que la matrice de la fonte de départ soit suffisamment chargée en carbone (matrice perlitique) [14].

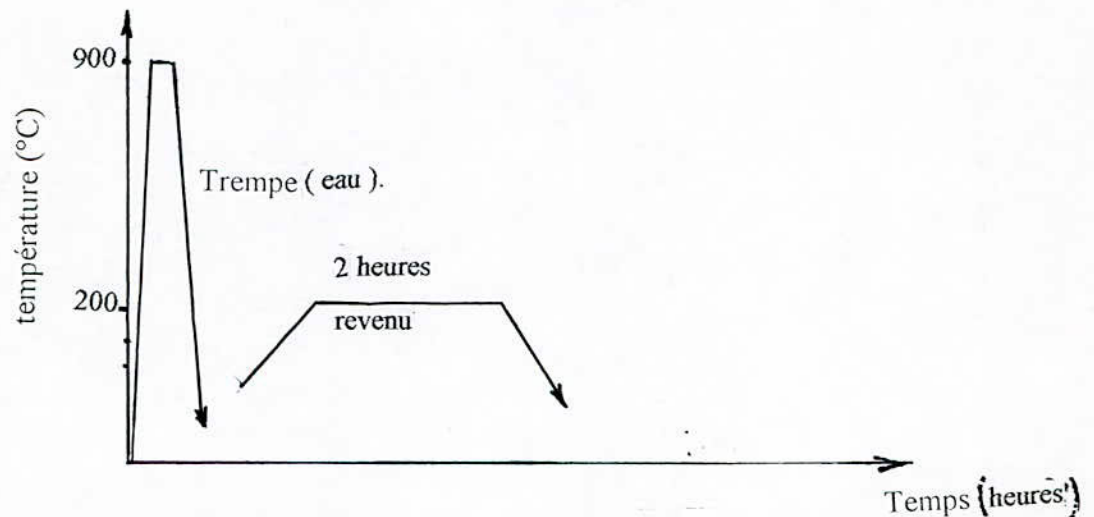


Figure 16 : Cycle thermique d'un durcissement par trempe à haute fréquence.

Un générateur de tension à haute fréquence (quelques Khz à quelques centaines de Khz) alimente un solénoïde qui constitue le primaire d'un transformateur dont le secondaire est la pièce à traiter comme indique la figure 17.

L'apport thermique dans la zone superficielle est dû:

- aux pertes par hystérésis magnétique
- à l'effet joule lié à l'existence du courant induit (courant de Foucault)

La zone efficace où circulent ces courants est limitée à une épaisseur P donnée par la relation de Kelvin:

$$P = 1.6 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot F}}$$

- avec
- P: épaisseur de la zone trempée en mm
 - ρ : résistance électrique en Ω mm
 - μ_r : perméabilité magnétique relative (H/mm)
 - F : fréquence en KHz.

L'effet de temps de chauffage par induction sur la dureté en surface et la profondeur de trempé d'une fonte non alliée est présente sur la figure 18 .

Deux méthodes de trempé sont utilisées suivant les dimensions et la forme des partie à traiter

- trempé générale instantanée
- trempé de proche en proche ou au défilé.

On trempé la couche superficielle après le chauffage par arrosage d'une douche d'eau suivant la fig 17 .

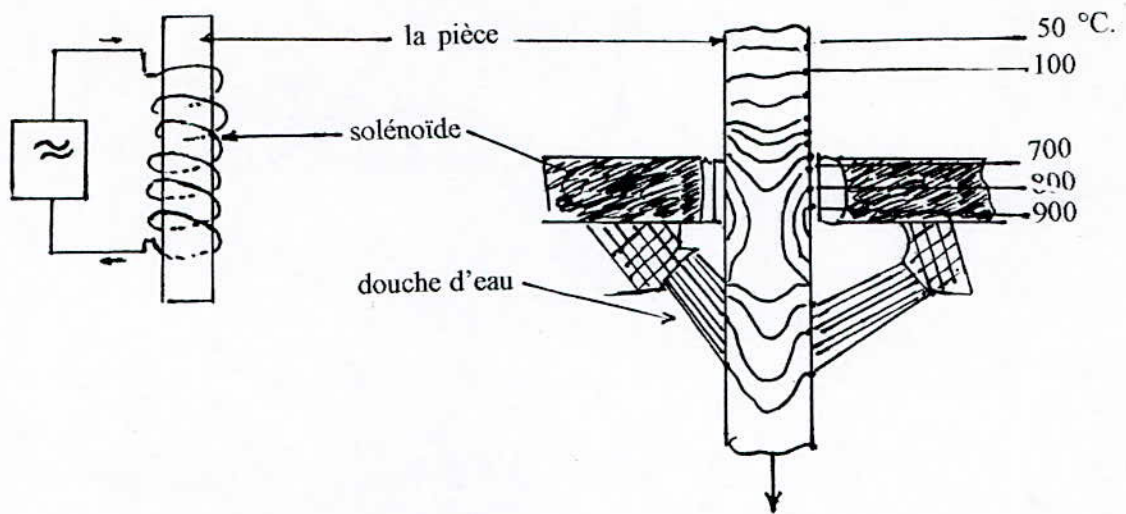


Figure 17 : Chauffage par induction [8]

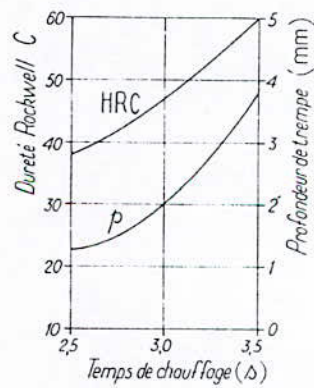


Fig 18 : Effet du temps de chauffage par induction sur la dureté en surface et sur la profondeur de trempe d'une fonte alliée [14]

CONCLUSION

Conclusion

Cette expertise a mis en relief les points fondamentaux suivants:

- Le matériau de l'arbre à cames est une fonte grise à graphite sphéroïdal.

- L'arbre à cames a subi un traitement de durcissement localisé au niveau des cames et des paliers par une trempe à haute fréquence suivie d'un revenu à basse température.

- La profondeur de trempe varie pour les paliers et les cames de 4 - 6 mm, le reste de l'état structural de l'arbre tel que le pignon ainsi que le cœur de la pièce est perlitique avec des traces de ferrite aureolaire.

- L'étude d'expertise a permis de travailler méthodiquement pour connaître l'ensemble de la pièce ainsi que sa gamme de fabrication qui se résume par la coulée, le traitement de ferritisation, l'usinage, le traitement de perlitisation, puis une trempe localisée à haute fréquence suivie d'un revenu à basse température.

Annexe

Analyse chimique: [16]

L'analyse chimique a été faite au laboratoire de contrôle de l'entreprise SNVI C.V.I. de Rouiba. Les méthodes utilisées dépendent des éléments à analyser:

- Analyse conductométrique pour C.S
- Analyse gravimétrie pour le Si
- Analyse volumétrique pour P, Cr.
- Analyse spectrophotométrique pour Mn.

1- Analyse conductométrique:

Principe:

Par calcination de la matière au four au environ 1300 °C, et oxydation ultérieure par l'oxydation le carbone et le soufre existants dans le four se transforment en dioxydes



Ces gaz passent par des cellules de mesure conductométriques qui contiennent des solutions de NaOH et H₂SO₄ / H₂O₂ respectivement, cela implique les réactions suivantes



Les concentrations de H_2SO_4 et $NaOH$ varient donc à l'intérieur des cellules, d'où il se produit une variation de la conductivité par changement de la concentration ionique, la variation conductimétrique est transformée en % de C et S par le bain de circuits électronique de l'appareil, et est affichée.

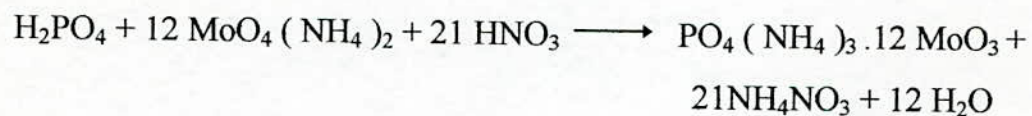
2- Analyse volumétrique:

a)- Dosage de phosphore:

Principe

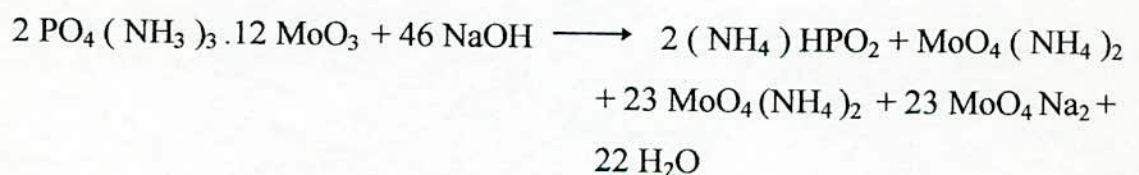
- Le mélange Nitro-Chloro-perchlorique fait passer le phosphore à l'état d'acide phosphorique

- Le réactif molybdénique tartrique précipite l'acide phosphorique sous forme de phosphomolybdane d'ammonium



- On opère à une température voisine de l'ébullition sous la formation d'acide tetremolybdique.

Le phosphomolybdate est formé est déposé alcalométriquement par $NaOH$ en titrinal



b)- Dosage de chrome:

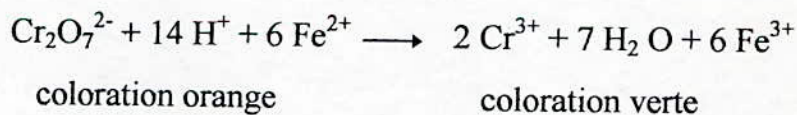
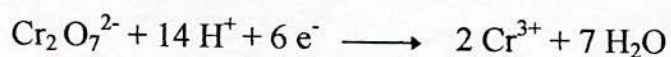
Principe:

Transformation redox des substances impliquées avec changement des coloration, ce qui permet de détecter les points d'équivalence.

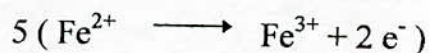
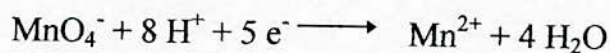
1- Oxydation de Cr^{3+} en Cr^{6+} avec l'acide perchlorique à chaud



2- Réduction du Cr^{6+} à l'aide d'un excès des solutions titrés de Fe^{2+}



3- Titrage en retours et evolution de l'excé avec le MnO_4^-



La première goutte et l'excès de permanganate colorie la dissolution en violet.

3- Analyse gravimétrique:

Dosage de Si:

Principe:

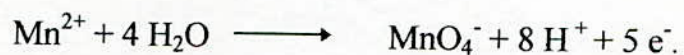
- Attaque par HCl, libérant le Si, et oxydation par NHO_3 et HClO_4
- Insolubilisation du SiO_2 en milieu perchlorique.
 - Filtration, calcination et pesée de résidu brute.
 - Volatilisation du SiO_2 par HF en présence de H_2SO_4 calcination et pesée.
 - Calcul par différence du % en Si: gravimétrie indirect.

4- Analyse spectrophotométrique:

Dosage de manganèse:

Principe:

- Mise en solution perchlorique (le chrome est oxydé et ne gêne pas ultérieurement)
- Oxydation de Manganèse à l'état permanganite



- Détermination spectrophotométrique

Bibliographie:

- [1] C. NASH
Technologie automobile
Edition TORONTO 1983
- [2] F. NATHANE
Comment marchent les autos
Première édition FERNAND NATHN Paris 1972
- [3] D. LANDRE
Découverte de la mécanique automobile
Edition FOUCHERE 1984
- [4] R. BRUN
Technique de l'ingénieur
B 328 Moteurs thermiques alternatifs discription par soupapes
- [5] F. BERNARD et L. VIVIER
Eléments de constructions Tome 5
Edition DUNOD 1969
- [6] J. BERNARD
Métallurgie générale
Edition MASSON 1984
- [7] R. T. DEHOFF et F. N. RHINES
Microscopie quantitative
Edition MASSON 1972.

- [8] J. BARRALIS et G. MAEDER
Précis de la Métallurgie appliquée
5^{ème} édition AFNOR 1990.
- [9] S.BENHADDAD
Etude statistique et caractéristiques mécaniques des phases de la fonte GSC
(30 - 50) alliée au Ni - Cr, Ni-Mo et Ni - V.
Projet de fin d'étude janvier 1988. *ENP*
- [10] G. CHAUSSIN
Métallurgie Tome 1
2^{ème} édition DUNOD 1976.
- [11] M. GEIER
Métallurgie de fonderie Tome 2
Edition EYROLLES Paris 1978.
- [12] A. ROOS
Précis de la Métallurgie appliquée
3^{ème} édition DUNOD- BORDAS Paris 1963.
- [13] J. BREGOU et J. MARGERIE
Techniques de l'ingénieur
M 410 Propriétés des fontes G.S
- [14] J. C. MARGERIE
Techniques de l'ingénieur
M 1145 Traitements thermiques des fontes G.S
- [15] A. BELABBAS
L'étude comparative d'une trempe HF et d'une trempe au chalumeau.
Projet de fin d'étude juin 1985. *ENP*

- [16] **M.Kissoum**
« Caractérisation des aciers inoxydables ferritiques et
austénitiques utilisés en coutellerie »
P.F.E 1991.