

République Algérienne Démocratique et populaire
===== * * =====
Ministère de l'industrie et de l'énergie
===== * * =====
Institut National Des Industries Manufacturières Boumerdès

THESE

présentée à L'I.N.I.M. pour obtenir le diplôme de

MAGISTER EN GENIE INDUSTRIEL

OPTION: MAINTENANCE DES EQUIPEMENTS

Par

Sitouah Noureddine

Sujet

**ETUDE ET ELABORATION DE LA FONTE GRISE LAMELLAIRE A
BASE DE LA FONTE D'AFFINAGE D'EL HADJAR EN SUBSTITUTION
DE LA FONTE DE MOULAGE IMPORTEE**

Soutenue le6....03...1995
devant la commission d'examen

Président	M. BEZZAZI B	PHD	Maitre de conférences
Rapporteur	M. LAINECHE R	DNT	Chargé de cours
Examineurs	M. ZAOUI M.S.	DE	Maitre de conférences
	M. KERCHOUCHE S.	DI	Chargé de cours
	M. DILMI H.	PHD	Chargé de cours

SUJET

Etude et élaboration d'une fonte grise lamellaire à base de la fonte d'affinage d'EL HADJAR en substitution de la fonte de moulage importée.

RESUME

Dans ce travail, on a étudié la possibilité de remplacer la fonte de moulage importée et coûteuse par la fonte d'affinage d'EL HADJAR produite en grande quantité dans notre pays pour l'obtention de l'acier. L'utilisation de la fonte d'affinage d'EL HADJAR en fonderie est limitée à 10÷15% dans la charge du lit de fusion des fours à cause de sa teneur élevée en manganèse qui est de l'ordre de 2,5÷3,0%.

Notre tâche consiste à intégrer, au maximum la fonte locale dans la composition des lits de fusion en utilisant les moyens techniques existant au complexe pompes-vannes de BERROUAGHIA. Pour cela, on a modifié la technologie de fusion afin d'éliminer par oxydation l'excès de manganèse contenu dans cette fonte. Les résultats escomptés sont très encourageants du fait qu'avec un lit de fusion composé de 100% de fonte d'affinage d'EL HADJAR on a obtenu un matériau ayant des propriétés mécaniques et technologiques satisfaisantes; notamment la structure, la composition chimique, la dureté, la résistance à la traction et la tenue à l'usure.

Le matériau élaboré trouve son application dans l'industrie manufacturière pour la fabrication de plus de 60% des pièces de machines destinées notamment à supporter des pressions, des chocs ou à résister à l'usure.

On peut citer les pièces suivantes: vannes, disque de friction, pignon de friction, fourchette, roues dentées, douilles, paliers, bielle du MAT, leviers, chapeau de cardes etc...

REMERCIEMENTS

Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire a été entamé au niveau du complexe pompes-vannes de BERROUAGHIA, au laboratoire de métallographie de la S.N.V.I. de ROUIBA et à l'atelier mécanique de l'I.N.I.M. de BOUMERDES.

Ce mémoire est le résultat d'un ensemble de travaux auquel beaucoup ont contribué diversement et sans eux la charge aurait été difficile et peut être, il n'aurait pas connu cette issue. A Messieurs DAOUZLI et TLILI respectivement Directeur et Directeur technique du complexe pompe-vanne de BERROUAGHIA ainsi qu'à l'ensemble du personnel, je tiens à exprimer toute ma gratitude pour leur chaleureux accueil et pour l'ensemble des moyens techniques nécessaires à la concrétisation de mes travaux qu'ils ont mis à ma disposition.

De même, que Messieurs AMRAOUI et NAHMAR respectivement responsable et Ingénieur métallurgiste du laboratoire de métallographie de la S.N.V.I. de ROUIBA trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance pour les supports techniques mis à ma disposition ainsi que pour leurs conseils et encouragements qui m'ont été d'un apport précieux.

Je voudrais témoigner ma très profonde reconnaissance aux maîtres de conférences GVETADZE et GOUSSEINOV ex. enseignants à l'I.N.I.M. pour leurs traductions, orientations et encouragements quand à la partie expérimentale des investigations relatées, qu'ils trouvent ici mes plus vifs remerciements.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur LAIMECHE , je le prie d'accepter mes plus sincères remerciements pour ses conseils éclairés, Qu'il trouve en ces lignes ma respectueuse gratitude pour ses encouragements et sa bienveillante disponibilité.

Que Monsieur BEZZAZI, maître de conférences à l'I.N.M.C. de Boumerdès qui s'est intéressé à mon travail et qui m'a fait l'honneur d'accepter d'examiner ce présent mémoire et de présider le jury.

Mes remerciements vont également à:

Monsieur KERCHOUCHE, chargé de cours à l'I.N.H.C. de Boumerdès pour avoir examiné ce travail et consenti à faire partie du jury.

Monsieur DILMI, chargé de cours à l'I.N.M.C. de Boumerdès pour avoir accepté d'examiner ce travail et participer au jury.

Monsieur ZAOUÏ, maître de conférences à l'I.N.I.M. de Boumerdès d'avoir bien voulu juger ce travail et participer au jury.

Je ne saurais oublier de remercier Monsieur ZERIZER, chargé de cours à l'I.N.I.M. pour son aide et ses précieux conseils.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui ont répondu favorablement à toutes mes sollicitations, sans oublier les responsables du département post-graduation de l'I.N.I.M., Monsieur KRID et Madame BELAÏD pour leurs contributions et conseils.

Notations utilisées

H.F.	Haut-fourneau
Fe_2O_3	Oxyde ferrique
Fe_3O_4	Oxyde de fer (II,III) (magnétite)
$FeCO_3$	Fer spathique
$CaCO_3$	Carbonate de calcium (castine)
γ	Austénite
Fe_3C	Cémentite
Mn_3C	Carbure de manganèse
$FeSi75$	Ferro-Silicium à 75%
G	Graphite
HB	Dureté Brinell
HRC	Dureté Rockwell (échelle C)
Ft15	Fonte grise lamellaire (R2)t = 15 kgf/cm ²
CO_2	Gaz carbonique
SO_2	Bioxyde de soufre
SO_3	Trioxyde de soufre
CaO	Oxyde de calcium
MgO	Oxyde de magnésium
Na_2O	Oxyde de sodium
K_2O	Oxyde de potassium
SiO_2	Silice
Al_2O_3	Alumine
TiO_2	Oxyde de titane
H_2O	Eau
HCL	Acide chloridrique
H_2SO_4	Acide sulfurique
HNO_3	Acide nitrique
NaOH	Soude
NaCL	Chlorure de sodium
$AgNO_3$	Nitrate d'argent
NH_4NO_3	Nitrate d'ammonium
$(NH_4)_6MO_7O_{24} \cdot 4H_2O$	Molybdate d'ammonium
$(NH_4)_2S_2O_8$	Persulfate d'ammonium
C_2H_5OH	Alcool éthylique
C	Carbone
Si	Silicium
Mn	Manganèse
P	Phosphore
S	Soufre
CCL_4	Tétrachlorure de carbone

Table des matières

Introduction	3
I. Fontes de première fusion	
I.1. Généralités	5
I.2. Formation de la fonte dans le haut-fourneau	5
I.3. Composants chimiques des fontes de première fusion	8
I.4. Classification des fontes de première fusion	10
II. Fontes de deuxième fusion	
II.1. Fonte grise lamellaire	13
II.2. Solidification de la fonte	
II.2.1. Généralités	14
II.2.2. Solidification des phases primaires et de l'eutectique	14
II.2.2.a. Solidification des phases primaires	14
II.2.2.b. Solidification de l'eutectique	15
II.3. Germination du graphite	15
II.4. Corrélacion structure-composition chimique	16
II.5. Influence de la composition chimique	16
II.6. Caractéristiques mécaniques	17
III. Influence de l'hérédité de la fonte du haut fourneau sur la fonte grise	
III.1. Historique	23
III.2. Influence de l'hérédité sur l'aspect du graphite	25
III.3. Influence de la fusion sur l'hérédité des fontes de première fusion ..	26
III.4. Influence de l'hérédité sur la structure et propriétés mécaniques	26
IV. Méthodes expérimentales	
IV.1. Elaboration de l'alliage	
IV.1.1. Fours d'élaboration	30
IV.1.1.a. Four rotatif	30
IV.1.1.b. Four à arc électrique	31
IV.1.2. Préparation de l'alliage	35

IV.2.	Contrôle de la composition chimique	
IV.2.a.	Détermination du Carbone et Soufre	44
IV.2.b.	Détermination du Silicium	47
IV.2.c.	Détermination du Phosphore	47
IV.2.d.	Détermination du Manganèse	48
IV.3.	Analyse des paramètres mécaniques	
IV.3.1.	Mesure de la résistance à la rupture	49
IV.3.2.	Mesure de la dureté	50
IV.4.	Examens micrographiques	
IV.4.1.	Principe de la micrographie	55
IV.4.2.	Préparation des échantillons	55
IV.4.3.	Examen au microscope optique	56
IV.4.4.	Etude de la microstructure	58
IV.4.4.1.	Etude micrographique	58
IV.4.4.1.a.	Mode opératoire	58
IV.4.4.1.b.	Analyse de la microstructure après correction et inoculation	62
IV.5.	Influence de l'épaisseur sur la structure des pièces	63
IV.5.1.	Analyse de la microstructure des échantillons de différents diamètres	74
IV.6.	Comportement du matériau à l'usure	
IV.6.1.	Généralités sur l'usure	75
IV.6.2.	Essais à l'usure	76
IV.6.3.	Plan d'expérimentation	78
IV.6.3.1.	Influence de la vitesse relative	79
IV.6.3.2.	Influence de la charge appliquée	80
IV.6.3.3.	Influence de la surface de contact	81
IV.7.	Application pratique du travail	83
	Conclusion générale	84
	Perspectives	86
	Bibliographie	87
	Liste des figures	92
	Annexes	95

INTRODUCTION

Notre pays, qui possède des gisements de fer ainsi qu'une importante industrie sidérurgique implantée à EL-HADJAR, sera appelé à utiliser une bonne partie de sa production de fonte d'affinage en fonderie; dont le tonnage est en progression continue.

La fonte d'affinage produite par les haut-fourneaux d'EL-HADJAR est du type "hématite" caractérisée en particulier par une teneur en Manganèse élevée d'environ 2,5-3,0%. Son intégration dans la composition des lits de fusion en fonderie nécessite une démanganésation jusqu'à la teneur convenable (0,9-1,0%), teneur admissible. Aussi difficile soit elle, son intégration est devenue aujourd'hui impérative et apparaît comme l'une des voies de relance de l'économie nationale.

La majorité des besoins en fonte moulable des fonderies nationales est satisfaite par le biais de l'importation, destinée pour la production de 50% de toutes les pièces des machines mécaniques et parmi elles 65% sont en fonte.

Actuellement, la fonte de moulage, tend à être remplacée par la fonte d'affinage grâce à certains avantages qu'elle présente:

- Son élaboration augmente le rendement du haut-fourneau et diminue la consommation du coke, d'où diminution du prix de revient de la fonte.

- Le graphite présent dans la fonte d'affinage est plus fin que celui de la fonte de moulage, ce qui augmente les propriétés mécaniques et permet d'élever la teneur en carbone dans la pièce.

- Amélioration des propriétés technologiques telles que l'usinabilité, la coulabilité ainsi que la diminution du retrait volumétrique.

- Diminution du prix de revient des pièces en fonte grise obtenue lors de la seconde fusion à partir des fontes d'affinage.

Le problème de l'amélioration de la fonte a un caractère complexe; il comprend le choix et la préparation du lit de fusion métallique et l'optimisation des processus de fusion de la fonte. Cette qualité requise est très importante pour toutes les branches de la construction mécanique. En pratique, la structure et les propriétés mécaniques des pièces moulées y compris le degré de

graphitisation et profondeur de blanchissement différent même si la composition chimique reste invariable. Cette différence est due au changement de la composition de la charge, ou l'utilisation des fontes de différents haut-fourneaux. La liaison entre les propriétés des matières premières de la charge métallique et celle des pièces coulées est nommée "hérédité". Ce phénomène est expliqué par la présence de telle ou telle quantité d'éléments rares, gaz et inclusions non métalliques, qui ne sont pas contrôlés généralement et qui sont conservés au cours de la seconde fusion. La présence de ces différentes inclusions crée une phase germinale stable, influant sur la cristallisation de la fonte.

La fonte d'affinage produites par les haut-fourneaux d'EL-HADJAR est du type "hématite" caractérisée en particulier par une teneur en manganèse élevée d'environ 2,9%. Son utilisation nécessite une démanganésation jusqu'à la teneur convenable (0,9-1%).

Notre travail consiste d'une part à élaborer une fonte grise lamellaire (Ft15) à partir d'un lit de fusion composé de 100% de fonte hématite d'EL HADJAR. Pour cela, une étude du processus technologique est nécessaire en vue d'une modification permettant une telle fusion.

Aussi, des investigations sur l'influence de l'épaisseur de la paroi et de l'hérédité de cette fonte sur la structure, la répartition et la forme du graphite dans la fonte élaborée sont indispensables à la réalisation de ce travail.

En effet, la présence du manganèse de l'ordre de 0,94-1,2% dans la fonte, augmente la stabilité de la cémentite et de la perlite. La ferrite manganèse ainsi formée a de meilleures caractéristiques mécaniques que la ferrite normale[35].

Pour mener à bien ce travail, un passage en revue sur les généralités des fontes s'avère nécessaire. A cet effet, une recherche bibliographique a été abordée dans les deux premiers chapitres.

L'influence de l'hérédité des fontes d'affinage sur les fontes grises a fait l'objet du troisième chapitre. Cette étude a été entamée dans le but d'intégrer au maximum la fonte d'affinage d'EL HADJAR en fonderie. Les différentes techniques expérimentales utilisées feront l'objet d'un quatrième chapitre. Cette partie est consolidée par l'interprétation des résultats obtenus, basée essentiellement sur les examens micrographiques de nos échantillons.

GENERALITES —

I.1. FONTES DE PREMIERE FUSION

Dans l'industrie sidérurgique, on élabore les fontes directement par réduction des oxydes de fer des minerais dans le haut fourneau. Elles portent le nom de fontes de première fusion.

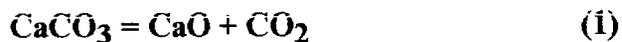
I.1.1. Généralités

Les facteurs d'élaboration: forme, dimensions et caractéristiques constructives du haut fourneau; composition chimique et structure minéralogique des minerais et de leurs proportions respectives dans les charges; composition et réactivité du coke; nature des fondants; mise au mille de coke; température, pression et débit du vent influent sur la composition chimique et la structure de la fonte obtenue. Toutes les caractéristiques du métal dépendent de sa structure, qui est elle même déterminée par: sa teneur en chacun de ses éléments, la loi de refroidissement du métal à partir de sa sortie du haut fourneau (coulée en sable, en coquille, en moule mixte; dimensions des gueuses et gueusets, formes et dimensions des pièces coulées directement en fonte de première fusion), la teneur en gaz dissous et leur nature, la présence d'une quantité plus ou moins grande de germe de cristallisation [36].

Toutes les fontes de première fusion renferment outre le fer et le carbone qui en sont les éléments constitutifs essentiels, du silicium, du manganèse, du phosphore et du soufre. Nous examinerons dans ce qui suit la formation de la fonte et l'origine des composants chimiques de la fonte de première fusion.

I.1.2. Formation de la fonte dans le haut fourneau

Après son introduction par le gueulard, la charge (minerai, combustible et fondant) perd son humidité, puis dès 300°C, commence la réduction de l'oxyde ferrique par l'oxyde de carbone; vers 500°C, a lieu la décomposition des carbonates s'opère vers 700°C suivant les réactions suivantes:



Au cours de la descente de la charge, la quantité de fer augmente; la cémentation a lieu à l'état solide, et favorise la fusion du métal. A environ deux mètres au dessus des tuyères, le tiers de la charge est fondu, ce qui correspond à la presque totalité de la fonte. Le métal a alors incorporé le phosphore, une forte proportion de manganèse et beaucoup de soufre. La fusion du laitier s'opère quand les charges arrivent au niveau des tuyères. A ce niveau la température atteint environ 2000°C pour les gaz et 1500°C pour les solides, la fonte subit alors une oxydation sensible; les teneurs en carbone, manganèse et phosphore reviennent à leur valeur normale, la première par combinaison directe entre le fer et le carbone, les autres par réduction des oxydes [11, 47].

Le schéma du haut fourneau [49] est présenté par la figure 1

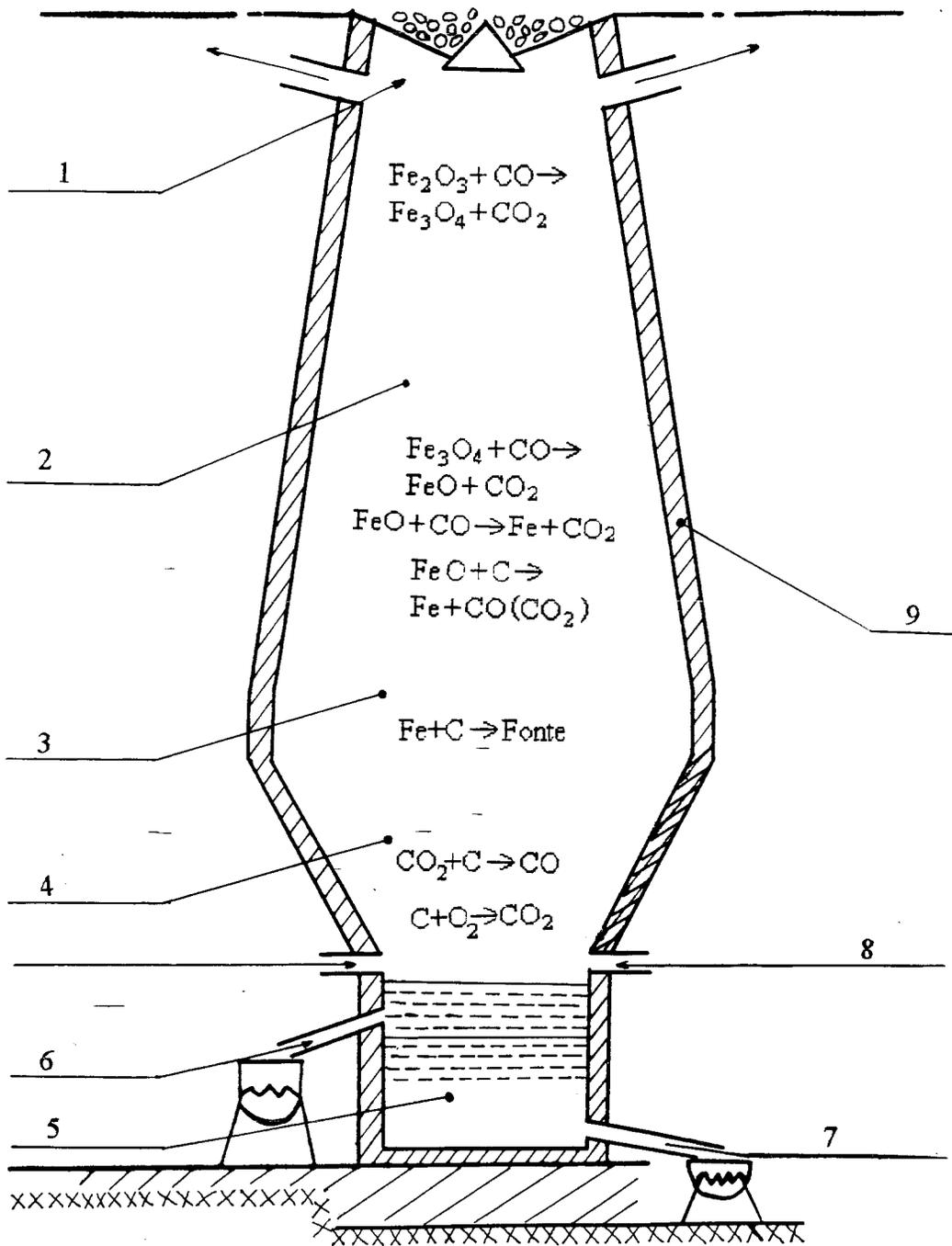


Fig.1 Schema du haut fourneau

1. Gueular
2. Cuve
3. Ventre
4. Etalages
5. Creuset
6. Trou de coulée du laitier
7. Trou de coulée de la fonte
8. Tuyères
9. Revêtement

I.1.3. Composants chimiques des fontes de première fusion

Toutes les fontes de première fusion présentent des composants chimiques communs: Carbone, Manganèse, Phosphore et Soufre ainsi que certaines impuretés inévitables telles que le Nickel, Chrome, Magnésium, Cuivre, etc. qui peuvent passer du minerai à la fonte par hérédité. Considérons brièvement la provenance de ces éléments.

- Carbone: la carburation s'opère, par contact avec le coke incandescent dans le creuset, où la fonte séjourne avant la coulée. La teneur en carbone est, toujours supérieure à celle qui peut être retenue en solution dans le fer Gamma (Fe γ) à la température 1450°C.

Les fontes contiennent donc toutes à l'état solide, du carbone insoluble, quelle que soit la température considérée au dessous de leur solidus (voir diagramme Fe-C).

Le carbone peut se trouver à l'état libre (graphite) ou combiné (Cémentite Fe $_3$ C).



Dans les fontes ordinaires, la teneur en carbone se situe généralement entre 3 et 4% [11, 13].

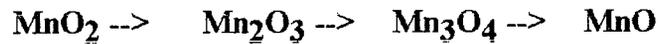
- Silicium: Cet élément provient de la réduction d'une partie de la silice libre ou combinée contenue dans les matériaux de la charge. La réduction n'a lieu qu'à partir de 1500°C. Il ne passe dans la fonte qu'une petite proportion du silicium total contenu dans la charge, la majeure partie se retrouvant dans le laitier.



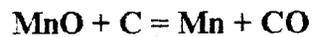
Le silicium joue un rôle essentiel dans la détermination de la structure métallographique d'une fonte, pour des conditions données de coulée et de refroidissement du métal.

La teneur en silicium d'une fonte est généralement comprise entre 0,5% et 4,5% pour l'ensemble des fontes courantes [35].

- Manganèse: Il provient de la réduction des oxydes de manganèse contenus dans les minerais de fer, ou qui sont ajoutés spécialement pour donner la teneur visée dans la fonte. La réduction se déroule selon le schéma suivant:

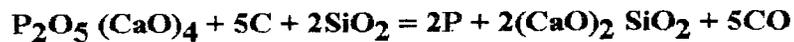


Le bioxyde de manganèse est réduit par le carbone solide selon la réaction



La fonte n'absorbe que le tiers environ du manganèse total de la charge. Les fontes ordinaires contiennent de 0,5 à 1,5% de Mn [55, 9].

- Phosphore: Il est apporté dans le lit de fusion en forme de phosphates de calcium et sa réduction en présence de la gangue du minerai (SiO_2) est réalisée grâce à la consommation du carbone solide



En raison de cette plus grande facilité de réduction, le phosphore passe presque intégralement dans le métal, sous forme de phosphure de fer (Fe_3P).

La teneur en phosphore est très variable dans les fontes, elle est comprise entre 0,05% à 2,5% [36, 13].

- Soufre: Il peut être apporté par les minerais sous forme de sulfure de fer, de soufre organique et de sulfates alcalino-terreux. Le plus grand apport en soufre provient du coke des charges. A la température 900 - 950°C, les sulfates sont progressivement dissociés et le soufre libéré, s'unit au fer réduit pour former le sulfure de fer (FeS) soluble dans la fonte.

En pratique, la teneur en soufre des fontes de haut fourneau est comprise entre 0,01% et 0,15% [17, 42].

I.14. Classification des fontes de première fusion

Les fontes d'affinage et de moulage utilisées en fonderie sont classées sur les tableaux (1) et (2) selon les normes soviétiques:

GOST 805-89 et GOST 4832-72 [47]

**CLASSIFICATION DES FONTES D'AFFINAGE UTILISEES
EN FONDERIE**

NUANCE	C	Composant en ‰										
		Manganèse dans le groupe			Phosphore dans la classe			Soufre dans la catégorie				
		I	II	III	A	B	I	1	2	3	4	
		FORTE MARTIN IOCT 805 - 69										
M1	-	0,91 ÷ 1,30	0,50	1,0	≤ 0,15	≤ 0,20	≤ 0,30	-	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,06
M2		0,51 ÷ 0,90	0,50	1,0	≤ 0,15	≤ 0,20	≤ 0,30	-	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,06
M3		Jusqu'à 0,50	1,0	1,5	≤ 0,15	≤ 0,20	≤ 0,30	-	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,06
		FORTE D'AFFINAGE DE QUALITE SUPERIEURE IOCT 805 - 69										
LBK1		0,91 ÷ 1,30	0,50	1,0	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	0,05	≤ 0,015	≤ 0,025	≤ 0,025	-
LBK2		0,51 ÷ 0,90	0,50	1,0	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	0,05	≤ 0,015	≤ 0,025	≤ 0,025	-
LBK3		Jusqu'à 0,50	1,0	1,5	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	0,05	≤ 0,015	≤ 0,025	≤ 0,025	-
		FORTE D'AFFINAGE DE QUALITE SUPERIEURE RAFFINEES TY 14 15 - 52 24										
LBKP1		0,91 ÷ 1,30	0,50	1,0	-	-	-	-	0,05	≤ 0,010	-	-
LBKP2	4,0-4,5	0,51 ÷ 0,90	0,50	1,0	-	-	-	-	0,05	≤ 0,010	-	-
LBKP3		Jusqu'à 0,50	1,0	1,5	-	-	-	-	0,05	≤ 0,010	-	-

Tableau N°1

CLASSIFICATION DES FONTES DE MOULAGE

NUANCE	C	SI	Composants en %															
			manganèse dans le groupe					Phosphore dans la classe					Soufre dans la catégorie					
			I	II	III	A	B	I	B	IOCT	4832	-	72	1	2	3	4	5
LK1	3,5 - 4,0	3,2 - 3,6	≤ 0,50	0,51	0,91	≤ 0,08	0,0081	0,13	0,31	0,71	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,06			
LK2	3,6 - 4,1	2,8 - 3,2		0,90	1,5		0,12	0,30	0,70	1,20								
LK3	3,7 - 4,2	2,4 - 2,8																
LK4	3,8 - 4,3	2,0 - 2,4																
LK5	3,9 - 4,4	1,6 - 2,0																
				FONTES DE MOULAGE RAFFINES PAR LE MAGNESIUM														
LKP0	3,4 - 3,9	3,26 - 3,75																
LKP1	3,5 - 4,0	2,76 - 3,25	≤ 0,50	0,51	-		0,11	0,13	0,31	0,71								
LKP2	3,6 - 4,1	2,26 - 2,75					≤ 0,10											
LKP3	3,7 - 4,2	1,76 - 2,25		0,90			0,20	0,30	0,70	1,20								
LKP4	3,9 - 4,4	1,26 - 1,75																
LKP5	4,0 - 4,5	0,75 - 1,25																

Tableau N°2

II. FONTES DE DEUXIEME FUSION

Le haut fourneau ne peut conférer à une fonte de première fusion une composition chimique convenable; quant à son utilisation pour la coulée des pièces dont on exige des caractéristiques déterminées. Il est alors nécessaire de procéder par mélange de plusieurs fontes, voire par addition à un tel mélange d'autres produits. Ces opérations ne se pratiquent aisément qu'en deuxième fusion.

II.1. Fonte grise lamellaire

C'est un alliage de Fe-C-Si qui contient comme impuretés inévitables du Mn, P et S. Dans la structure de ces fontes, tout le carbone ou sa plus grande partie se trouve sous forme de graphite lamellaire. Par conséquent, l'influence de chaque élément sur les propriétés mécaniques et technologiques de la fonte est très importante. En changeant la composition chimique, il est possible d'obtenir toutes les structures dans les pièces coulées en fonte [33]. Les composants chimiques ont une influence différente sur la matrice métallique et le graphite. Certains d'entre eux favorisent la graphitisation, d'autres au contraire, la freinent. En disposant les éléments suivant leur influence sur la graphitisation on obtient le tableau N°3 [24].

N° d'ordre	Eléments graphitisants	N d'ordre	Eléments anti-graphitisants
1	Al	1	W
2	C	2	Mn
3	Si	3	Cr
4	Ti	4	V
5	Cu	5	S
6	P	6	Mg
7	Co	7	Ce
8	Zr	8	Te

Tableau N°3. Classification des éléments graphitisants et anti-graphitisants

II.2. Solidification de la fonte

II.2.1. Généralités

La solidification est l'un des changements d'état qui a une grande importance pratique dans le domaine des matériaux métalliques. Elle consiste en un grossissement d'atomes ou de molécules à la surface des cristaux déjà formés. Deux phénomènes apparaissent au cours de la solidification d'un métal ou d'un alliage, un certain nombre d'atomes se fixent sur les cristaux préexistants dans le liquide tandis que d'autres atomes se détachent de ceux-ci (voir figure N°2). Au cours de la solidification d'un matériau métallique, on passe d'un état liquide à un état solide par des états intermédiaires où coexistent des cristaux solides et une phase liquide [33, 19].

II.2.2. Solidification des phases primaires et de l'eutectique

La fonte industrielle se distingue par la grande variation des processus de solidification d'où un grand nombre de structures diverses se forment et sont conditionnées par l'existence de transformation eutectique et eutectoïde [10, 24].

II.2.2.a Solidification des phases primaires

Dans les fontes hypoeutectiques, la phase primaire est l'austénite. Le germe d'austénite (γ) s'accroît sous forme de dendrite; son accroissement est favorisé par le processus de la diffusion. Dans les fontes hyper-eutectiques. C'est le graphite qui est la phase primaire pour le système stable, comme le montre le diagramme Fe-Graphite de la figure 3 ou la cémentite pour le système métastable.

II.2.2.b. Solidification de l'eutectique

L'eutectique commence à se solidifier quand le processus de la cristallisation des phases primaires est terminé. Au cours de cette étape, l'aspect du graphite et le type de la fonte à obtenir sont déterminés. sur le diagramme le point C' représente le point eutectique, et l'alliage eutectique se distingue par le fait qu'il ait la température de refroidissement la plus basse de toute la série. La réaction eutectique apparaît quand l'alliage de composition $C_{C'}$ se solidifie à la température $T_{C'}$; la solidification s'accompagne de la cristallisation simultanée des deux phases solides γ et G de composition $C_{E'}$ et $C_{F'}$



A l'équilibre, deux phases solides et une phase liquide coexistent au point C'. A pression constante, il découle de la règle des phases que le système à zéro degré de liberté; c'est à dire que la composition du liquide, et la température à laquelle il se solidifie sont invariants.

En d'autres termes, la réaction de solidification arrive à terme avant que la température ne commence à décroître.

Le solide formé consiste en un mélange intime des phases de γ et G dont les proportions sont les suivantes:

$$\frac{\text{Proportion de la phase } \gamma}{\text{Proportion de la phase G}} = \frac{C'F'}{E'C'}$$

II.3. Germination du graphite dans les fontes grises lamellaires

Lors de la solidification, la germination a lieu au hasard. A partir de pré regroupements d'atomes Fe, C, Si vers la température eutectique, il y a tendance à la formation des

groupements des carbures de Fe (Fe_3C) avec rejet du silicium à leur entourage d'où constitution de groupements de FeSi . La réaction de ces groupements aboutit à la formation des germes de graphite [19].



En résumé, la germination provient de la décomposition des carbures en particulier de la cémentite (Fe_3C). La présence des impuretés tels que Sn, Pb, Bi, Cu... L'hérédité (forme du graphite dans les matières qui constituent le lit de fusion, le mode fusion), la température de coulée et les agents inoculants influent sur la germination du graphite et sa morphologie dans la fonte.

II.4. Corrélation structure-composition chimique de la fonte

Le choix de la composition chimique de la fonte, en fonction de la structure est basé sur les diagrammes structuraux voir figures 5, 6, 7. Parmi ces diagrammes, seuls ceux de LAPLANCHE tracés en 1946 constituent à présents les meilleurs graphes de prédiction de la structure d'une fonte. Ils se rapportent à des fontes industrielles non alliées [19, 21].

On remarque que le diagramme de MAURER (1924) ne tient pas compte de la vitesse de refroidissement (fonction de la température de coulée et massivité du moule). Celui de GREINER et KLINGENSTEIN (1926) cumulant en ordonnées carbone et Silicium n'est pas satisfaisant. En effet, une fonte à 2% Si et 3% C n'équivaut pas à une fonte à 1% Si et 4% C.

II.5. Influence de la composition chimique sur la structure de la fonte

a/ Influence du carbone et du Silicium

Ces deux éléments se compensent et agissent dans la même direction. En changeant leur teneur, on obtient la structure désirée et éviter la formation de la structure ferritique à graphite grossier.

Généralement dans la fonte industrielle, la teneur de ces éléments est comprise entre 3 et 4% pour le Carbone et 1,2 à 3% pour le Silicium [24, 10].

b/ Influence du Manganèse

Le Manganèse tend à favoriser la formation de fonte blanche où la carbone est à l'état de Cémentite. Le Manganèse se combinant au Soufre, combat l'action nuisible de celui-ci. Il transforme l'eutectique ternaire (Fe-C-Si) en eutectique quaternaire (Fe-C-Si-Mn) de température légèrement plus basse en se solidifiant en dernier, c'est à dire entre les cellules eutectiques, où il accroît la stabilité de la Cémentite en formant un carbure mixte ($\text{Fe}_3\text{C-Mn}_3\text{C}$). Il accroît la finesse des lamelles de graphite. C'est donc un élément carburigène et anti-graphitisant. Il provoque dans le réseau intercellulaire (entre les cellules eutectiques), une précipitation de perlite. La largeur du réseau perlitique s'accroît avec le titre de Mn [35, 9].

c/ Influence du Phosphore et du Soufre

L'addition de Phosphore dans la fonte hypoeutectique Fe-C-Si forme un eutectique. A bas point de fusion, la stéadite qui stabilise la perlite dans son voisinage et n'influe pas sur la ferrite précipitée. Le plus souvent la teneur du Phosphore dans la fonte de deuxième fusion ne dépasse pas 0,15 à 0,20% mais parfois, elle atteint 0,40 à 0,50%.

Le soufre provoque le grossissement des lamelles de graphite c'est à dire une impureté nocive. Il a une action blanchissante sur la matrice en stabilisant la Cémentite. La teneur en Soufre dans la fonte doit être ramenée de 0,10 à 0,12% [15, 3].

II.6. Caractéristiques mécaniques des fontes grises

Les propriétés mécaniques de la fonte sont déterminées par sa structure et surtout par son composant graphitique. Elle dépendent de la quantité, grandeur et distribution des

inclusions de graphite. Par ailleurs, la présence du graphite donne à la fonte des qualités précieuses quant à son utilisation comme matériau de construction [3].

La résistance à la traction d'une fonte est d'autant plus grande que la matrice est plus résistante et le graphite moins abondant. En ce qui concerne la matrice, la Perlite est nettement le constituant le plus favorable. Quelles que soient les propriétés de la matrice métallique, l'allongement à la traction de la fonte grise est pratiquement nul (0,5%).

En compression, la fonte est susceptible de subir des déformations importantes et la rupture se produit sous forme d'un cisaillement sous un angle de 45°.

En flexion, l'altération de la résistance produite par les lamelles de graphite est également plus faible qu'en traction. La dureté de la fonte grise HB = 143 à 255 Kgf/mm². Une étude récente de WEIS et ORTHS [3] sur les fontes perlitiques fait correspondre R_m, HB et composition chimique:

$$R_m = 257,4 + 1,31 \text{ HB} - 63,8 (\%C) - 25 (\%Si) - 31,4 (\%P)$$

Lorsque la matrice métallique d'une fonte grise a une structure perlitique, elle assure une tenue à l'usure et une résistance maximale. Les propriétés de résistance, de ténacité et de plasticité des fontes grises lamellaires forment un ensemble relativement médiocre. Le graphite confère aux fontes une grande capacité d'amortissement des vibrations. Les fontes grises présentent une bonne tenue au frottement et résistance à la corrosion; conservation de la totalité de leurs propriétés de 100 à 300°C, et une bonne tenue aux chocs thermiques importants [24].

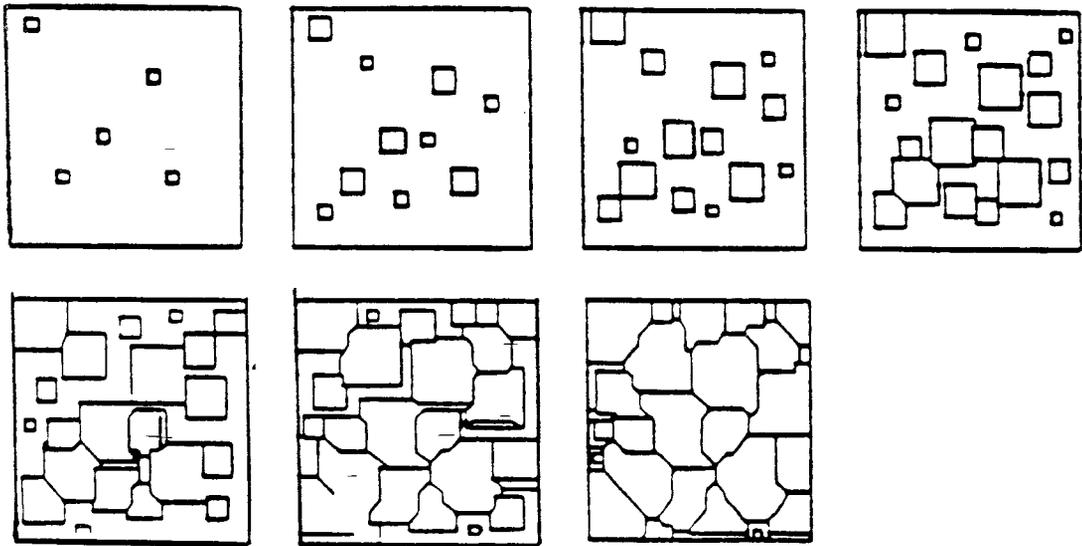


Fig. 2 - Schématisation de la cristallisation d'un métal.

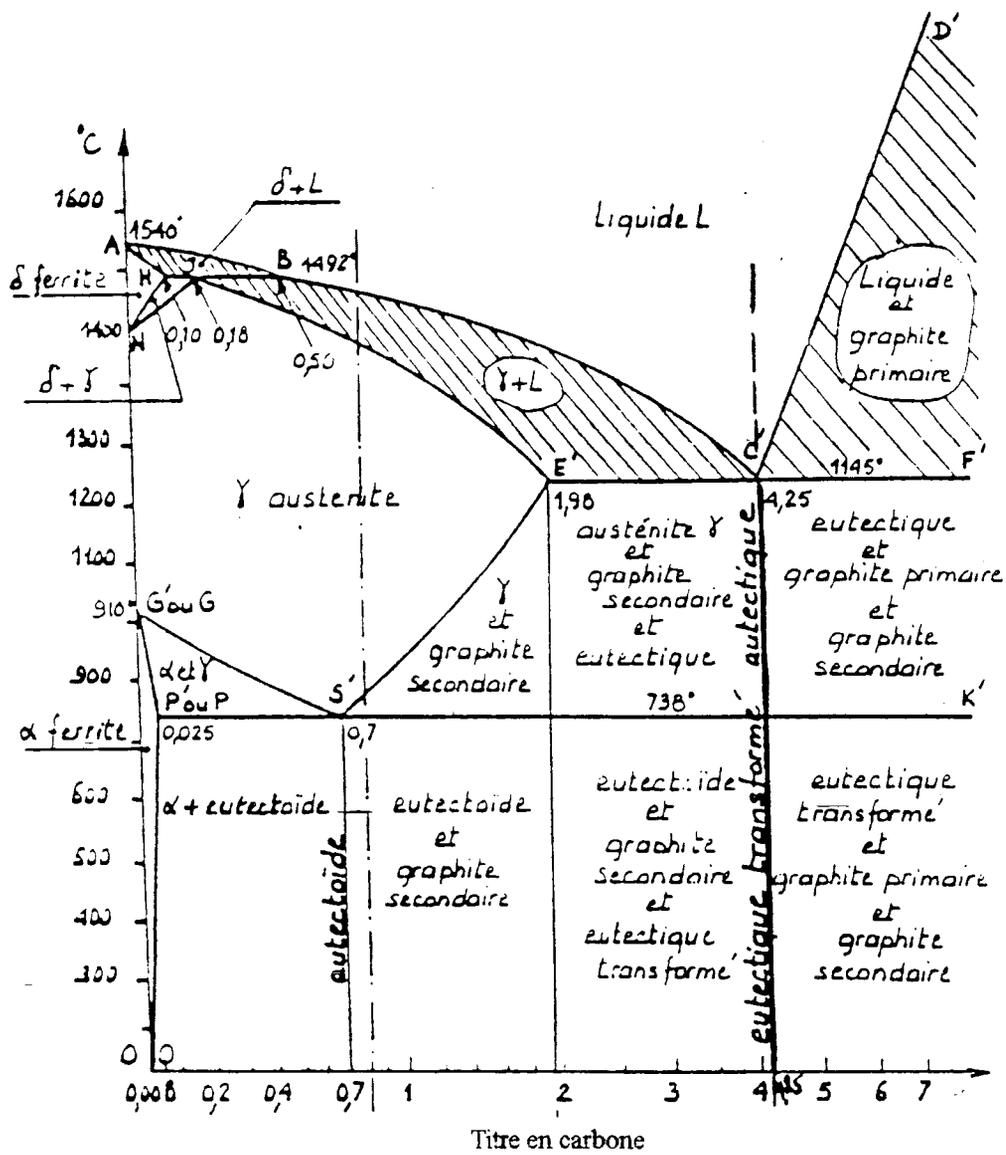


Fig. 3 - Diagramme stable Fer-Graphite en constituants micrographiques.

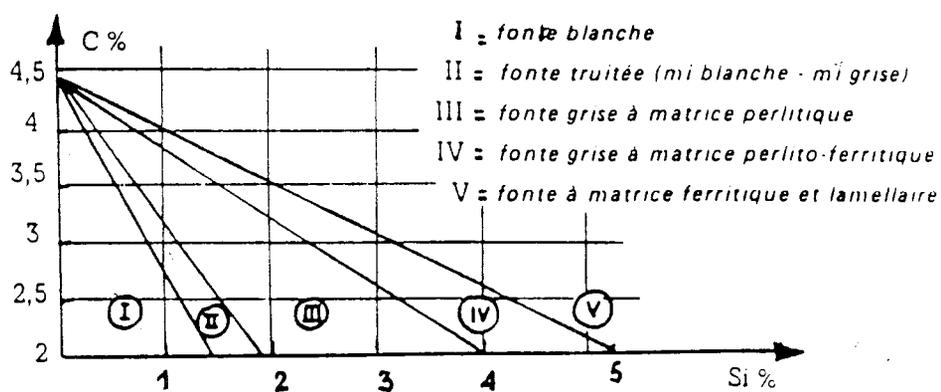


Fig. 4. Diagramme de MAURER

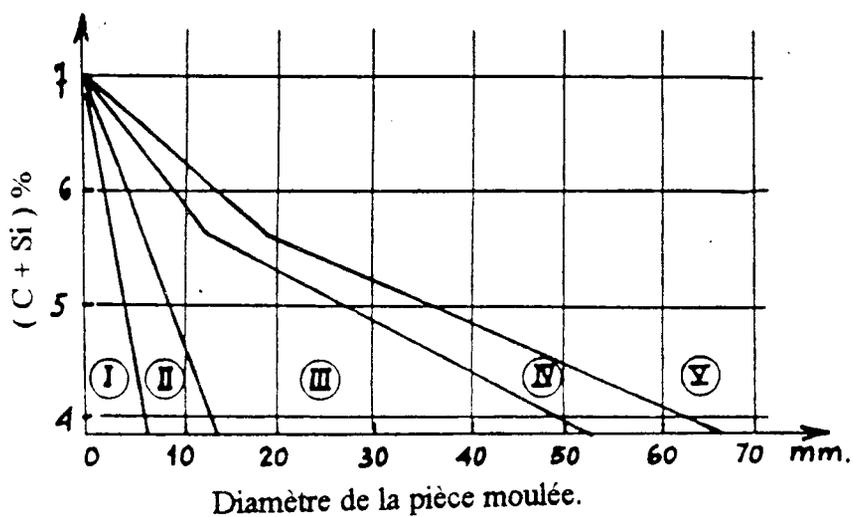


Fig. 5 - Diagramme de GREINER

- I- Fonte blanche
- II- Fonte truitée
- III- Fonte grise à matrice perlitique
- IV- Fonte grise à matrice ferrito-perlitique
- V- Fonte grise à matrice ferritique

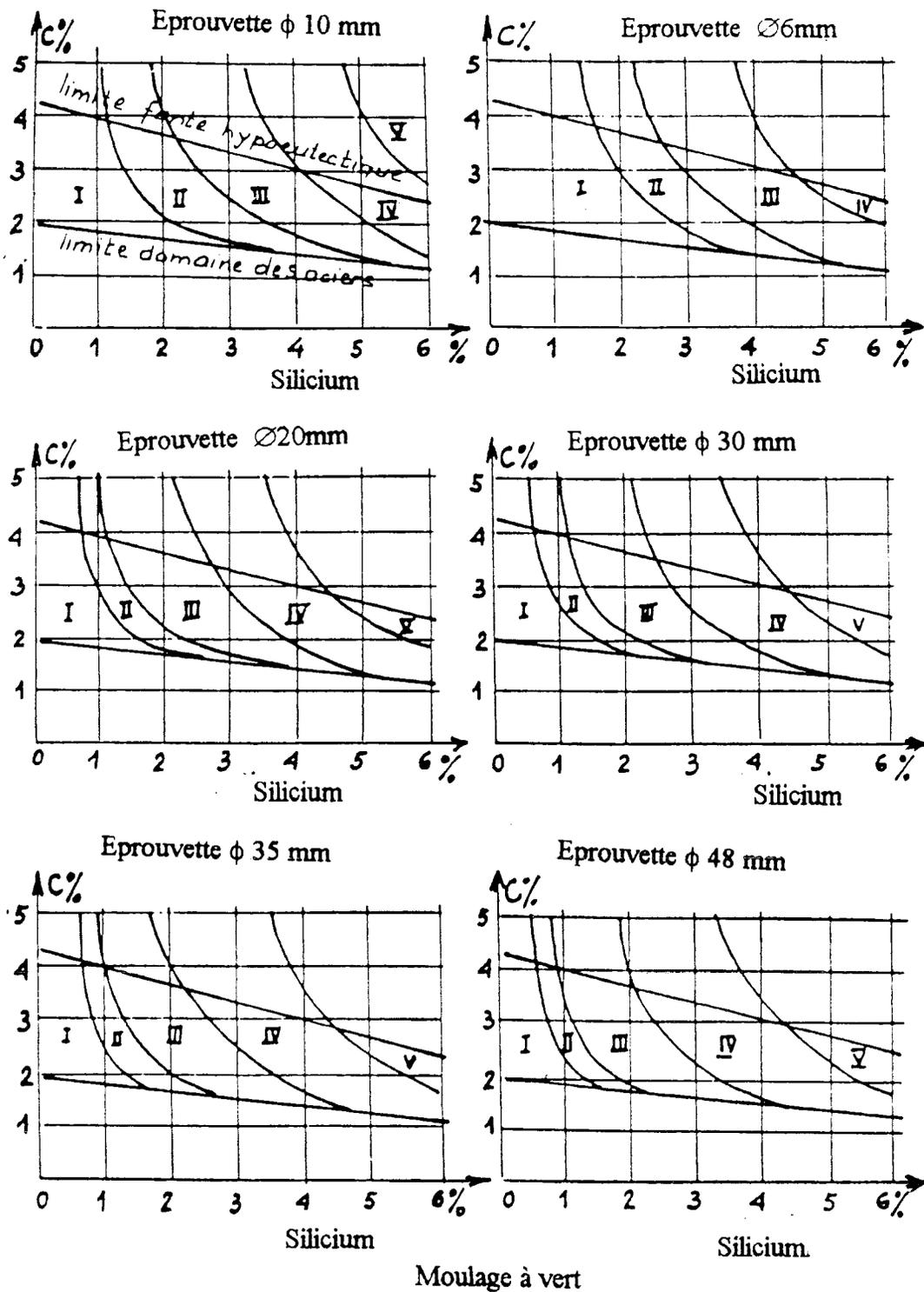


Fig.6. Relation structure-composition-massivité des pièces moulées
(D'après H.LAPLANCHE)

III. INFLUENCE DE L'HEREDITE DE LA FONTE DU HAUT-FOURNEAU SUR LA FONTE GRISE

L'influence de la matière première sur la qualité des fontes de deuxième fusion est appelée hérédité. Celle-ci se manifeste notamment sur l'aspect du graphite, au niveau de la structure et des propriétés mécaniques. De nombreux travaux ont été entamés dans ce sens.

III.1. Historique

En 1950, MICHKOV étudia l'influence de la fonte d'affinage sur le blanchissement des pièces coulées. BOGATCHOV, en 1962, indiqua que la présence de germes actifs influe sur la structure de la fonte. BOUBLIK et KARPOV (1963) étudièrent l'influence de la fonte du haut-fourneau sur les propriétés des fontes grises.

LEVIL, COLLAUD et THIEME en 1967 étudièrent l'influence de la température de chauffage sur l'hérédité négative des fontes du haut-fourneau. GUEROSTOV et CHEVTCHOUK en 1971 reprirent les mêmes travaux de 1967 et affirmèrent qu'avec l'augmentation de la température de coulée, l'hérédité est manifestée brusquement. L'hypothèse de BOUBLIK et KARPOV fût confortée plus tard par les investigations de LEVIL et PATTERSON en 1973, KLETSKIN en 1975- POPELINSKI, GEIER en 1978- BANONDIN, VERTMAN et JOUKOV en 1979 déduirent que l'hérédité provoquée par les inclusions non métalliques et gaz influent sur les propriétés de fonderie. PLATONOV, PETRITCHENKO, ALEKSENDROV et d'autre (1980) affirmèrent que l'introduction de la fonte d'affinage dans le lit de fusion de la fonte grise permet d'augmenter les propriétés de fonderie de la fonte. Depuis 1970, la littérature s'est enrichie. De nombreux travaux sur l'influence de l'hérédité des fontes d'affinage et son intégration dans la composition du lit de fusion de la fonte grise ont vu le jour.

De ce passage en revue de l'historique, nous retenons quelques axes d'investigations pouvant servir de base à l'obtention de la fonte grise.

III.2. Influence de l'hérédité sur l'aspect du graphite

L'hérédité est provoquée par les inclusions non métalliques. La dissolution des micro-additions et gaz agissent sur l'état liquide. Ils déterminent le comportement de la fonte pendant la cristallisation et par conséquent ses propriétés de fonderie et celles physico-mécaniques.

Quand la teneur en Silicium dans le métal liquide est élevée, le processus de la graphitisation s'accélère et on obtient du graphite ayant de grandes dimensions [19]. Dans des conditions identiques de composition en éléments principaux et de vitesse de refroidissement, deux fontes industrielles, préparées à partir de matières premières différentes, peuvent donner des formes de graphite très différentes et cela est du :

- à la nature des matières premières (forme du graphite dans ces matières qui constitue le lit de fusion).
- au mode de fusion (four rotatif, four à induction, cubilot...).
- aux traces d'oligo-éléments.

L'hérédité du graphite est plus importante que la fusion est plus rapide et que les particules du graphite de la charge n'auront pas le temps de disparaître complètement. Les nids de graphite grossier ont un caractère héréditaire classique [15].

Ce raisonnement est rencontré dans les travaux de VERTMAN (1979) qui présente à cet effet, la fonte grise comme une solution troublée par les inclusions non métalliques; principalement par les silicates ou même par le graphite [53].

D'autre part, nous savons que le germe actif peut créer de grandes quantités de graphite dispersé, ce qui diminue la teneur en carbone dans la solution solide et sur les frontières Austénite-Graphite. Cette condition favorise l'augmentation de la quantité de ferrite dans la fonte, c'est à dire, permet de diminuer la quantité de carbone lié [5].

Par ailleurs, l'examen de la fonte liquide comme un système monophasé (sans tenir compte des inclusions étrangères) a révélé des résultats forts intéressants.

Dans cette phase, il y a plusieurs états de carbone dissout d'ions partiels jusqu'aux grosses molécules qui constituent des polymères complexes de carbone et de fer [25].

Cet avis est compromis entre l'avis quand la fonte liquide est présentée comme une véritable solution ou solution colloïdale [53, 5].

Quand à la nature de l'hérédité, elle est liée avec la quantité et l'état des phases germinales. La composition des germes dépend de l'origine de la fonte du haut-fourneau. Son influence est considérable lors de la production des pièces, à partir d'une fonte à basse teneur en Silicium [52].

Pour améliorer la qualité de la fonte et prévenir l'excès de carbone qui se dégage sous forme de graphite grossier pendant la cristallisation, on utilise les gueuses de petites masses. L'amélioration de la qualité de la fonte de moulage à teneur élevée en Silicium, obtenue dans le haut-fourneau à température élevée, est plus difficile que celle des fontes d'affinage à basse teneur en Silicium, obtenues à basse température [48].

Dans la fonte d'affinage, l'inclusion du graphite est plus petite malgré la haute teneur en carbone et ce, à cause de la composition chimique du laitier. Les teneurs en Phosphore et Soufre sont elles aussi, plus faibles. La quantité des micro-additions et des gaz avant et après la deuxième fusion sont plus faibles que celle contenue dans les fontes de moulage [55].

La solution commode est de faire une fusion à base d'un lit de fusion blanc, c'est à dire contenant la fonte en gueuse blanche sans inclusion de graphite et on ajoute du FeSi. Dans ce cas, la fonte obtenue ne contiendra pas de germe de graphite. Les mélangeurs à induction "MIXER" permettent d'obtenir une telle fonte [2].

Selon les travaux de TOULACHERMIT et ZILL, la fonte d'affinage synthétique est obtenue par addition de FeSi dans le jet de coulée de la fonte d'affinage au cours de son évacuation du haut-fourneau. Cette fonte contiendra moins de micro-additions, gaz et inclusion de graphite et la quantité de la perlite dans la matrice est augmentée [54]. La fonte grise obtenue à partir de cette fonte, contient du graphite de petites dimensions (forme favorable) et beaucoup de perlite [2, 52].

III.3. Influence de la fusion sur l'hérédité des fontes de première fusion

Selon cet axe, certains avis sur la manifestation de l'hérédité étaient opposés:

- Le fait d'augmenter la température de chauffage jusqu'à 1440-1450°C permet de supprimer l'influence négative de l'hérédité [39]; cette recommandation a été proposée par LEVIL en 1967.

- En revanche, des résultats des travaux entamés par GUEROTSOV en 1971, nous retenons qu'en augmentant la température de surchauffe et particulièrement celle de coulée, les propriétés de l'hérédité se manifestent brusquement [20].

Aussi, d'autres résultats établis juste après, on retient que l'hérédité négative est manifestée faiblement lors de l'utilisation de la fonte du haut-fourneau à basse teneur en Silicium [28]. Toutefois, vers la fin de l'année 1970, plusieurs spécialistes et chercheurs ont étudié l'influence de la fusion de la fonte d'affinage dans le cubilot. Les conclusions apparues montrent que le changement des inclusions graphitiques et la matrice métallique de ces fontes est insignifiant après leur fusion au cubilot [23].

A cet effet, nous nous proposons d'entamer une contribution à la production d'une fonte grise sans addition de la fonte de moulage et d'étudier certaines propriétés de ce produit pour enfin le comparer à celui issu du procédé actuel.

III.4. Influence de l'hérédité sur la structure et les propriétés mécaniques

Le caractère de formation de la structure d'une fonte est déterminé d'après plusieurs facteurs à savoir, sa composition chimique, la température de surchauffe et de coulée, son temps de maintien et sa vitesse de refroidissement. Souvent pour une même composition chimique, même technologie de fusion et conditions de refroidissement, les pièces coulées ont des structures totalement différentes. En pratique, cette différence de structure dans les pièces coulées existe à cause des propriétés issues de la fonte de première fusion, qui à son tour

dépend de la matière première, la technologie de fusion dans le haut-fourneau (température de l'air, composition de la charge et du laitier) et les conditions de coulée en gueuse [22].

Les propriétés mécaniques des fontes et la qualité des pièces coulées peuvent être différentes telles que la macro et microstructure, le blanchissement et formation de différents défauts ce qui est incommode pour la production en série du fait de l'augmentation brusque du rebut [4].

L'influence de la fusion dans le four à induction sur la fonte du haut-fourneau améliore la structure et les propriétés de ces fontes mais leur degré d'amélioration dépend de leur provenance [39]. Pour compenser le manque de Silicium lors de l'utilisation de la fonte d'affinage, on ajoute le FeSi dont la provenance et la composition chimique influent considérablement sur le blanchissement de la fonte. Cet état de fait fut admis après observation de la diminution du blanchissement de la fonte modifiée quand on augmente la teneur en Calcium et en Aluminium dans le FeSi [46].

Le remplacement de la fonte de moulage par la fonte d'affinage nécessite un contrôle obligatoire de la structure et composition chimique pendant la fusion [44, 12].

L'influence de la fonte d'affinage sur le blanchissement n'est pas évidente. MITCHKOV (1950) [41] pense que ce remplacement n'influe pas sur le blanchissement [8]. D'autres chercheurs et spécialistes tels que KLESKIM en 1979 et LEVIL en 1972 ont affirmé que le blanchissement augmente lors de l'utilisation des fontes d'affinage [31, 40].

L'explication réside en la diminution de la quantité des germes graphitiques, inclusions non métalliques et à l'augmentation de l'Azote. On remarque aussi, que la quantité d'Azote qui stabilise la perlite dans la fonte d'affinage est à peu près de 0,004% tandis que dans la fonte de moulage, elle est de l'ordre de 0,002%.

La fusion à base de fonte d'affinage s'oppose à la formation des fissures à cause de sa teneur en PHOSPHORE [31]. Les tapures représente 25% des pièces rebutées provenant de la fonte des haut-fourneaux à teneur élevée en Silicium [8].

En utilisant la fonte d'affinage, on remarque qu'il y a augmentation des propriétés mécaniques de 8 à 10% et de la densité des pièces coulées [45]. Par contre, en utilisant la fonte de moulage, on remarque qu'il y a oxillation des propriétés physico-mécaniques [29].

Une comparaison a été faite sur les structures et propriétés mécaniques des fontes grises obtenues à partir des fontes de moulage et d'affinage.

Il ressort que les fontes grises obtenues à partir des fontes d'affinage sont caractérisées par une augmentation de la résistance à la rupture par traction, de la dureté et une diminution des inclusions de graphite, qui sont dispersées et distribuées régulièrement [38].

En considérant l'influence des quantités des fontes d'affinage utilisées dans le lit de fusion, certains supposent que cette quantité est limitée à 10-15% [26], pour d'autres, cette limite atteint les 20% [36] voir même jusqu'à 60% pour les pièces simples [32].

On remarque que l'utilisation de 20% de fonte d'affinage a permis de diminuer les défauts de porosité [38]. En examinant les propriétés mécaniques de la fonte fondue à base de fonte d'affinage et de moulage à teneur faible en Silicium, on remarque qu'il y a augmentation des propriétés mécaniques [2, 1, 8, 30].

Nous retenons également des divergences en ce qui concerne la dureté du matériau [30, 34]. Toutefois, au début des années 1980, on affirme que les propriétés mécaniques sont améliorées d'une manière toujours faible [27].

— L'amélioration des propriétés mécaniques des pièces coulées obtenues à base de fonte d'affinage est expliquée par la perlitisation de la matrice métallique et de la forme du graphite [8, 30].

Actuellement, il n'y a pas d'avis commun sur l'influence des fontes d'affinage sur les propriétés mécaniques des pièces moulées. Pour justifier cela, il faut examiner les méthodes de contrôle et les critères d'estimation des propriétés mécaniques des fontes grises. L'estimation de la qualité des fontes selon leur teneur en éléments essentiels (C, Si, Mn, P et S) reste non convaincante et incomplète du fait de l'influence de l'hérédité. C'est pourquoi le calcul de la résistance et la dureté selon le degré de saturation ne convient pas [13, 43]. L'analyse de ces informations scientifiques montre que la nature de la fonte du haut-fourneau (sa fusion dans le haut-fourneau, régime de coulée en gueuse, composition chimique des éléments essentiels et micro-additions influent sur les propriétés des fontes grises.

La tâche de nos travaux consiste à:

- 1. montrer la possibilité d'utiliser la fonte d'affinage d'EL-HADJAR comme composant essentiel du lit de fusion de la fonte grise.
- 2. Chercher la technologie de fusion rationnelle de la fonte grise à base de la fonte d'affinage d'EL- HADJAR caractérisée par une teneur élevée de Manganèse (2,9%).
- 3. Etudier l'influence de l'épaisseur de la pièce sur la structure et les propriétés mécaniques de la fonte grise fondue à base de cette fonte.
- 4 Analyse du comportement du matériau à l'usure.

EXPERIMENTATION

IV. METHODES EXPERIMENTALES

Les méthodes expérimentales employées concernent l'élaboration de l'alliage, la préparation des échantillons pour l'examen micrographique et le comportement du matériau à l'usure.

IV.1. Elaboration de l'alliage

À l'échelle industrielle, plusieurs procédés sont utilisés pour l'obtention de la fonte grise lamellaire. Nous employons pour nos investigations deux types de fours: un four rotatif chauffé au gaz et un four à arc électrique.

IV.1.1. Fours d'élaboration

L'élaboration des fontes se pratique actuellement, en utilisant plusieurs types de fours. Parmi ces derniers, nous retenons le four rotatif ainsi que celui à l'arc électrique, procédés d'ailleurs existant au niveau du complexe pompes-vannes de BERROUAGHIA.

IV.1.1.a. Four rotatif

Ce type de four (fig.7) est d'une capacité de cinq (05) tonnes, garni d'un pisé sur la base de SiO_2 , avec une humidité de 6% de composition chimique suivante:

92,8 % SiO_2 ; 5,8 % Al_2O_3 ; 0,3 % TiO_2 ; 0,4 % Fe_2O_3 ; 0,1 % CaO ; 0,1 % MgO ; 0,1 % Na_2O ; 0,5 % K_2O .

Il comporte sur la cheminée, un échangeur qui récupère une partie de la chaleur des fumées pour réchauffer l'air de combustion (300 - 420°). La rotation du four ajoute au chauffage par rayonnement, une transmission de chaleur par conductibilité. Cet appareil a l'avantage d'accepter des charges variées: fonte neuve, retours, ferrailles avec injection correspondante du graphite.

Le chauffage direct entraîne des pertes au feu assez élevées sur les éléments comme le Carbone, le Silicium et le Manganèse et pouvant atteindre 20%, ce qui permet l'obtention d'une fonte neuve à haute teneur en carbone (4% environ) [49].

IV.1.1.b. Four à arc électrique

La charge métallique est chauffée par rayonnement à l'arc et par échauffement direct du au passage du courant dans la masse métallique. Le four (fig.8), d'une capacité de trois (03) tonnes, est garni d'un revêtement basique de composition chimique suivante:

91% MgO; 4,7% Fe₂O₃; 2,6 % CaO; 0,3 % Al₂O₃; 1,1 % SiO₂

Il est alimenté en courant triphasé (trois électrodes verticales, disposées en plan, aux sommets d'un triangle équilatéral). La tension d'alimentation est d'environ 200 volts pendant la fusion. La hauteur des électrodes au dessus de la surface du bain est déterminée par des régulateurs automatiques.

Le four à arc électrique présentent de nombreux avantages:

- pertes au feu réduites et constantes
- obtention de hautes températures favorables pour amorcer les réactions chimiques d'affinage.
- risque d'oxydation très diminué
- réglage plus facile de la température du bain

Le régime de la température est réglé en utilisant la méthode de mesure par contact. L'impulsion du thermocouple (Pt - Rd/Pt 10%) est transmise au potentiomètre (voir figures 9 et 10).

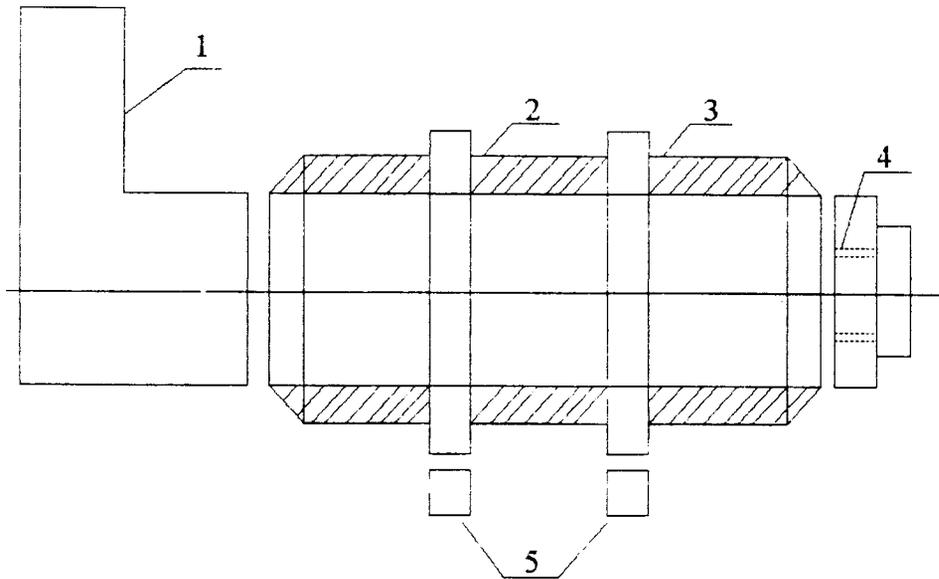


Fig7. Four rotatif

1. Raccord d'échappement
2. Revêtement du four
3. Tambour rotatif
4. Brûleur
5. Galets d'entraînement du tambour

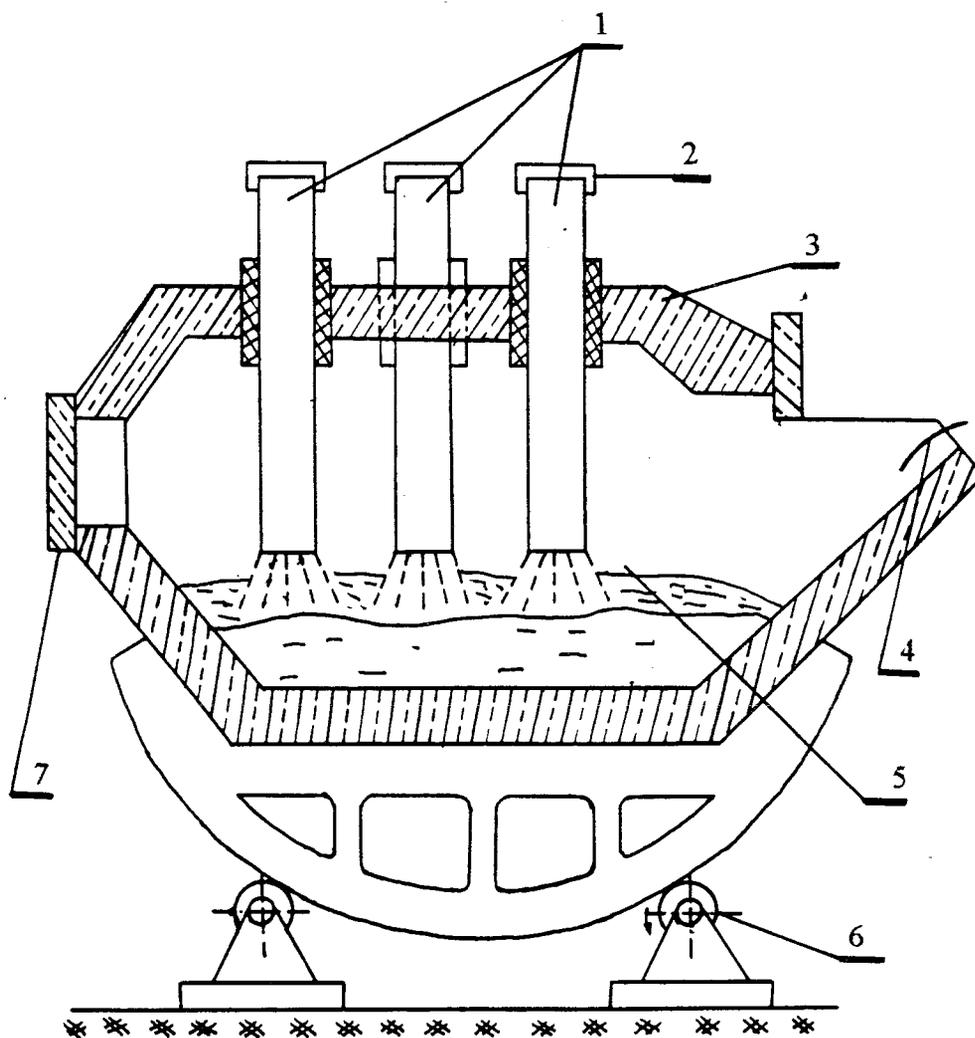


Fig.8. Four à arc électrique

- 1.Électrodes
- 2.Porte électrode
- 3.Voûte mobile
- 4.Trou de coulée
- 5.Creuset
- 6.Système de basculement
- 7.Porte de chargement des additions
et d'évacuation de la scorie

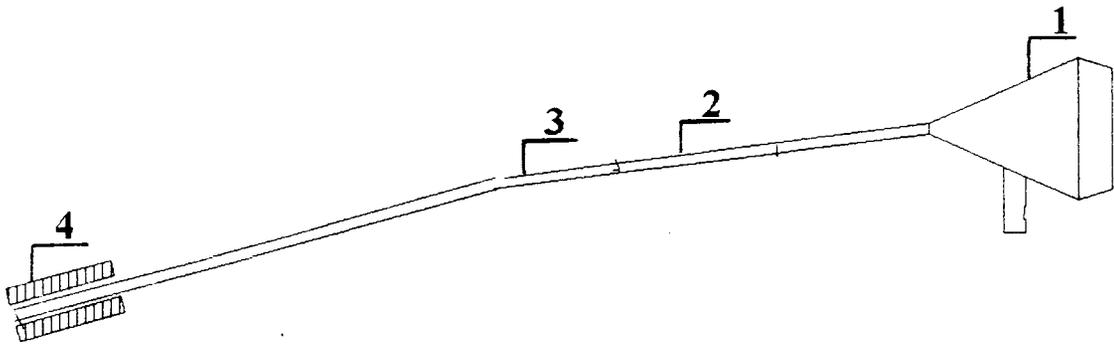


Fig.9.Canne pyrométrique

- 1.Indicateur numérique de température
- 2.Cable de compensation
- 3.Canne coudée
- 4.Bloc de contact

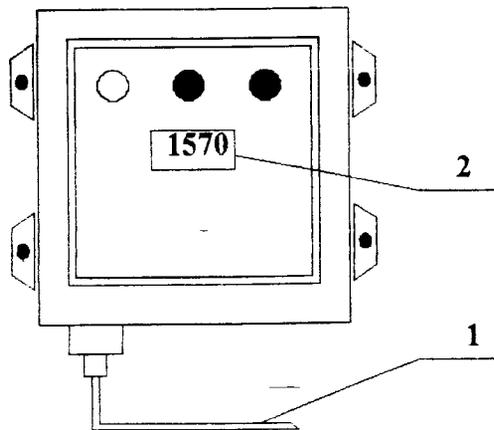


Fig.10.Appareil mural de température Type DTK01A

- 1.Thermocouple Pt-Rd/Pt 10%
- 2.Indicateur de température

IV.1.2. Préparation de l'alliage

L'alliage a été préparé à partir d'une fonte de première fusion élaborée au complexe sidérurgique d'EL- HADJAR. de composition chimique suivante :

[3,89 - 4,20 % C; 0,90 - 1,00 % Si; 2,50 - 2,90 % Mn; 0,01 % P; 0,022 % S]

Cette composition est présentée sous forme de gueuse de (05) kg en quantité de 2,5 T et 90 kg de Ca CO₃. La fonte est fondue dans le four rotatif dont la sole est recouverte de SiO₂ en quantité de quarante (40) kg. Quand le métal est passé à l'état pâteux, on a insufflé de l'air chaud provenant des récupérateurs, pour oxyder le Manganèse.

La réaction chimique $[Mn + O_2 \rightarrow MnO + CO_2 + Q]$ se traduit par un dégagement de chaleur, d'où l'augmentation de la température du métal. La fusion a durée 2 h 30 mn.

La scorie étant évacuée au fur et à mesure que le métal s'encrasse. après contrôle de la composition chimique, nous avons remarqué qu'il y a eu, une oxydation partielle de 15,6 % C; 14% Si et 27,6 % Mn. Le métal liquide ainsi obtenu est de composition chimique suivante:

3,42 % C; 0,75 % Si et 2,10 % Mn. Il apparaît donc que la teneur en Manganèse étant encore élevée, nous avons maintenu le métal liquide dans le four et insufflé de l'air par période de quinze (15) minutes durant 1 h 30 mn pour évacuer la scorie du métal à chaque fois qu'il s'encrasse. Ce qui nous a permis de diminuer davantage la teneur en Manganèse et ce jusqu'à 1,5 % soit 60 % de la teneur initiale ont été oxydé.

Pour atteindre une teneur en Manganèse de l'ordre de 0,9 à 1,0%, nous avons transféré le métal liquide de composition suivante: 3,2 % C; 0,5 % Si et 1,5 % Mn au four à arc électrique avec revêtement basique dont la sole été recouverte par Fe₂O₃ en quantité de 2,5 % du poids du métal liquide, qui servira de vecteur oxygène pour l'oxydation du Manganèse, Silicium et du Carbone. Lors de cette période, le courant a été débranché. Pour rendre le laitier fluide et faciliter son évacuation du four, on a ajouté de la silice en quantité de quarante (40) kg. Après une (01) heure d'affinage, on a rétabli le courant électrique afin de surchauffer le métal et procéder à la correction de la composition chimique par addition de quinze (15) kg de Carbone, dix (10) kg de Phosphore sous forme de brique et soixante (60) Kg de FeSi75.

Après contrôle de la composition chimique finale, on a obtenu les résultats suivants: 3,63 - 3,70 % C; 2,23 - 2,35 % Si; 0,94 - 0,97 % Mn; 0,50 % P; 0,013 % S soit 62 % de sa teneur ont été oxydé dans le four à arc électrique [50]. La fusion dans le processus duplex fours rotatif et à arc électrique permet de diminuer la teneur du Manganèse de 2,7 % à 0,95 %.

Les compositions chimiques obtenues sont représentées sous forme de tableau récapitulatif N°4. Quant aux teneurs du Manganèse et du Silicium de la fonte d'affinage, elles figurent au tableau N°5 et leurs variations sont illustrées graphiquement sur la figure 11

La température de fusion était contrôlée par canne pyrométrique avec indicateur numérique de température (voir fig.9)..

Teneur des éléments en %

Nuance de la fonte	C	Si	Mn	P	S	Oxydation du Manganèse en %
Fonte d'affinage en gueuse (S.N.S.)	3,89-4,20	0,90-1,20	2,5-2,9	0,010	0,022	-
Après la fusion dans le four rotatif	3,42	0,45	2,10	-	-	27,6
Après insufflation de l'air au four rotatif	3,2	0,25	1,5	-	-	60
Après affinage et correction au four à arc électrique	3,63-3,70	2,23-2,35	0,94-0,97	0,50	0,013	62

Tableau N°4: Variation de la composition chimique du métal pendant la fusion

N° Echantillon	% Mn	% Si	N° Echantillon	% Mn	% Si
1	2,50	0,36	16	2,39	0,92
2	2,45	0,43	17	2,77	0,90
3	2,02	0,58	18	3,00	0,85
4	2,15	0,90	19	2,39	0,68
5	2,23	0,37	20	2,77	0,98
6	1,80	0,81	21	2,39	0,63
7	2,52	0,42	22	2,46	0,69
8	2,36	0,53	23	3,20	1,05
9	2,54	0,47	24	2,62	1,03
10	2,02	0,49	25	2,70	1,03
11	2,30	0,96	26	3,00	0,70
12	2,45	0,62	27	2,10	0,75
13	1,94	0,28	28	2,00	0,33
14	2,30	0,69	29	2,68	0,36
15	2,44	0,79	30	3,20	0,85

Tableau N°5 Variation de la teneur en Mn et Si dans la fonte d'affinage d'EL HADJAR

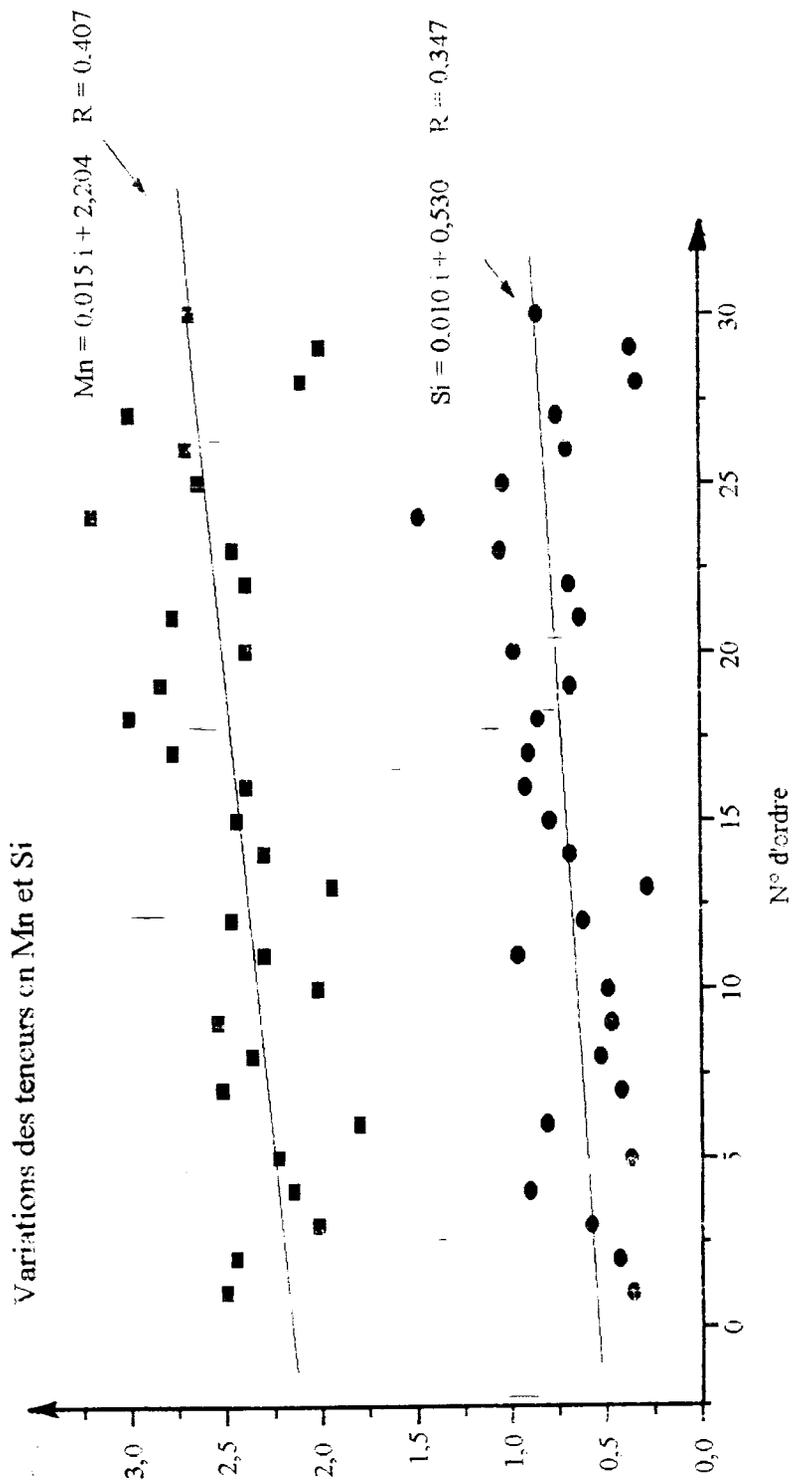


Fig.1.1 Variation des teneurs de Mn et Si dans la fonte d'affinage d'EL HADJAR

Les valeurs de la teneur en Silicium prélevées sur différents lots de matière (fonte d'affinage d'EL- HADJAR) varie de 0,33 à 1,05%. Cette faible teneur en silicium permet d'améliorer la qualité de la fonte de première fusion, du fait qu'elle conduit à une graphitisation en lamelles fines et petites sans inclusions de graphite grossier qui a un caractère héréditaire classique lors de la seconde fusion.

Quant à la teneur en manganèse prélevée sur les mêmes lots, elle varie de 1,80 à 3,20%. Cette teneur semble être très élevée par rapport à celle des fontes d'affinage utilisées en fonderie (0,50 à 1,50%) selon GOST 805-69 (voir tableau N°1). La teneur élevée en manganèse conduit à l'obtention d'un matériau ayant des propriétés mécaniques et technologiques réduites telles que l'usinabilité et la capacité d'amortissement. Ceci est du à la présence des carbures mixtes de manganèse et de fer (Mn_3C , Fe_3C) qui augmentent la fragilité du matériau.

Il est à noter que cette teneur varie d'une façon aléatoire dans une fourchette assez large, ce qui est dû au fait qu'il est très difficile de fixer un pourcentage bien déterminé de la fonte d'affinage d'EL- HADJAR dans la composition du lit de fusion des fontes grises. Ce qui nous a conduit à la recherche d'une méthode permettant de diminuer cette teneur jusqu'à 0,94%, tout en utilisant les moyens techniques existants au complexe pompes-vannes de BERROUAGHIA afin d'obtenir un matériau répondant aux exigences techniques.

Pour le contrôle de la structure et de la composition chimique, on a utilisé des éprouvettes normalisées selon la norme Allemande TGL 15477/03, voir figures 12 et 13

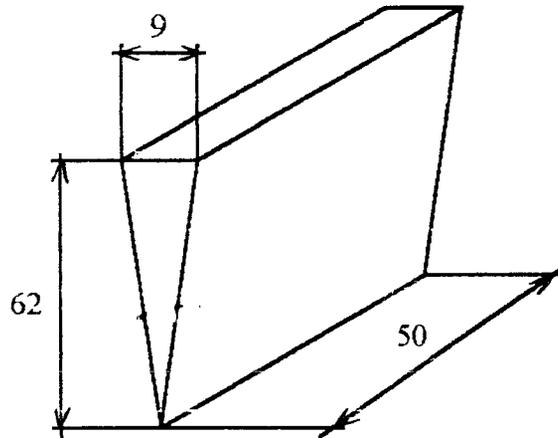


Fig.12 Eprouvette visuelle

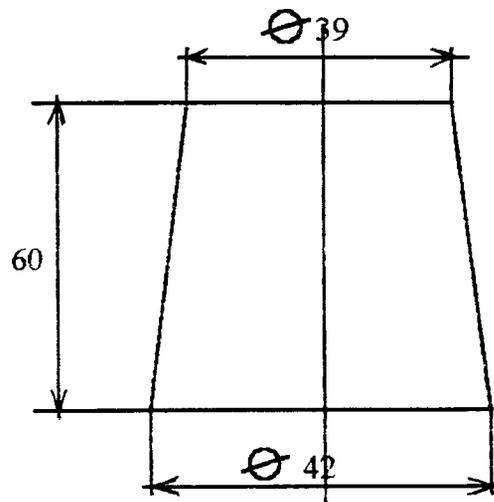


Fig.13. Eprouvette de contrôle de la composition chimique

L'analyse des prélèvements aléatoire du matériau à élaborer en fonction du temps, nous a permis de voir l'évolution du taux d'oxydation du manganèse. La cinétique de la réaction d'oxydation du manganèse, dans les fours rotatif et à arc électrique est représentée graphiquement sur les figures 14 et 15, ci-après.

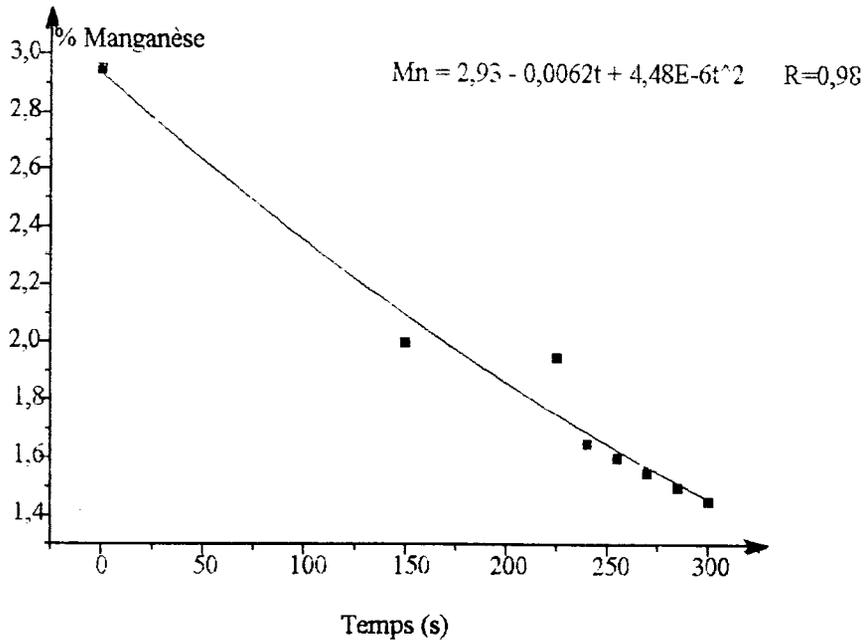


Fig.14 Oxydation du Manganèse dans le four rotatif

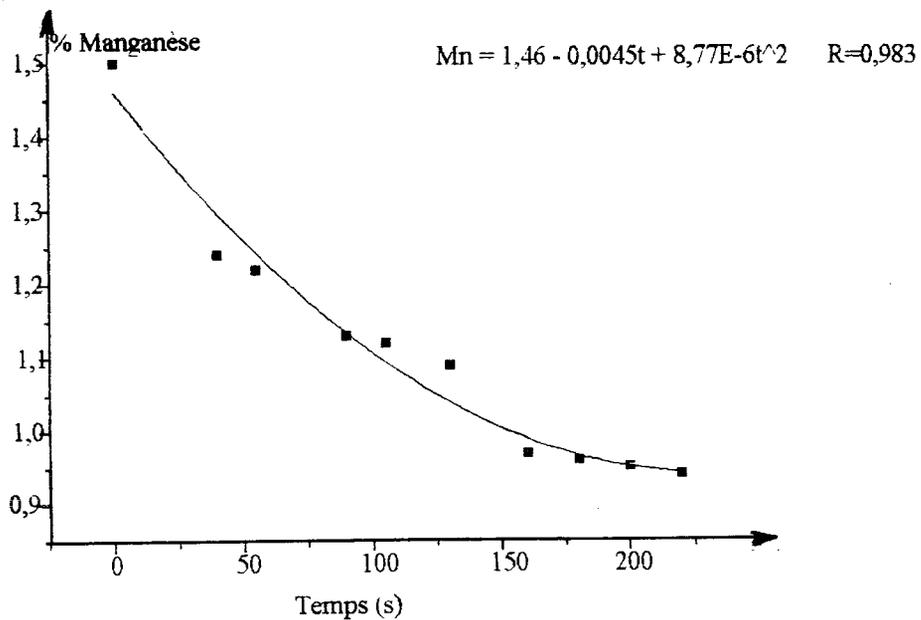


Fig.15 Oxydation du manganèse dans le four à arc électrique

La réaction d'oxydation du manganèse est exothermique, elle s'amorce dès que le métal passe à l'état pâteux, soit à la 130^{ème} minute. Elle se poursuit grâce au vecteur oxygène apporté par insufflation d'air ou par l'oxyde de fer respectivement dans les fours rotatif et à arc électrique.

Nous constatons ainsi, que la démanganésation de la fonte d'affinage d'EL HADJAR avec les moyens existant au complexe de BERROUAGHIA prend beaucoup de temps, ce qui influe négativement sur la production. Néanmoins, il existe un procédé breveté très efficace qui consiste à insuffler du tétrachlorure de Carbone CCL_4 liquide sous pression d'azote dans le bain.

Une tonne de fonte nécessite cinq (05) à vingt (20) kg de CCL_4 selon la composition de la fonte et le taux d'élimination désiré [36]. Le schéma du dispositif est donné sur la figure 16.

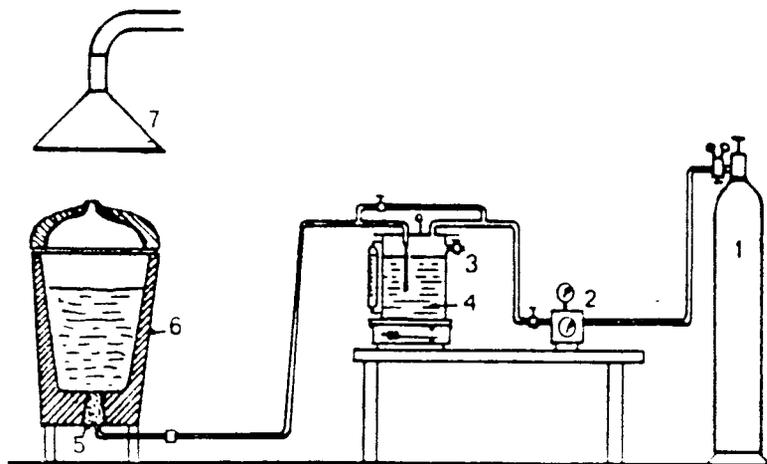


Fig.16 Dispositif de démanganésation par CCL₄

1. Bouteille d'azote
2. Débitmètre
3. Vanne
4. Récipient de CCL₄
5. Bouchon poreux
6. Poche de traitement
7. Hotte

IV.2. Analyse chimique

La composition chimique influe sur la cristallisation et la graphitisation de la fonte. En changeant la composition chimique, on peut obtenir telle ou telle structure et, par conséquent, telle ou telle propriétés de la fonte.

Avant la percée du four, on prélève un échantillon pour l'analyser et procéder à la détermination rapide du Carbone et du Silicium. Une fois leur teneur est convenable, on prélève un autre échantillon pour la détermination des principaux éléments de la fonte tels que: C, Si, Mn, P, S (voir fig.12).

La composition chimique de la fonte ainsi élaborée, est donnée dans le tableau suivant.

N° Echantillon	Eléments chimique en %					Indice de saturation
	C	Si	Mn	P	S	
1/1	3,81	2,21	0,95	0,07	0,032	1,08
1/2	3,77	2,08	0,97	0,067	0,021	1,05
1/3	3,74	2,24	0,94	0,057	0,015	1,06
2/1	3,74	2,52	0,95	0,057	0,013	1,09
2/2	3,63	2,53	0,95	0,054	0,016	1,06
2/3	3,84	2,52	0,94	0,062	0,013	1,12

Tableau N°6, Composition chimique de la fonte élaborée

IV.2.a. Détermination du Carbone et du Soufre

On détermine la teneur de ces deux éléments par la méthode volumétrique qui consiste à mesurer les volumes de CO₂ et SO₂. Après combustion des copeaux prélevés sur l'échantillon dans un bain d'oxygène (voir Fig.17 et 18).

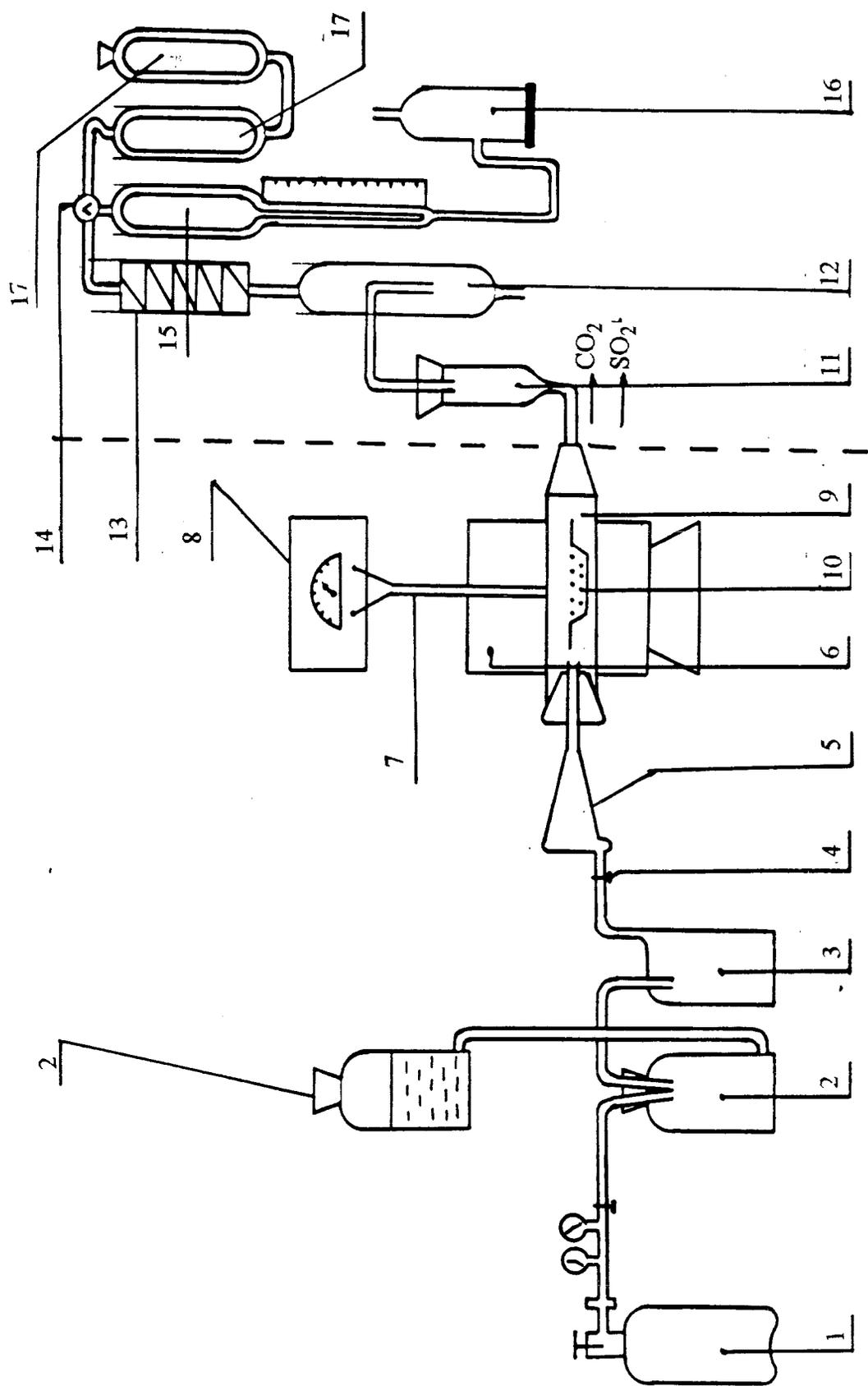


Fig. 17 - Dispositif de détermination du carbone et du soufre.

1. Bouteille d'oxygène - 2. Débitmètre (régulateur d'oxygène) - 3. Purificateur d'oxygène - 4. Robinet d'arrêt - 5. Fenêtre de la calcination - 6. Four - 7. Thermo-élément - 8. Galvanomètre - 9. Tube en pyrolyse - 10. Nacelle de copeaux - 11. Fibre en coton - 12. Filtre de H_2SO_4 - 13. Serpentin de refroidissement - 14. Robinet à trois voies - 15. Burette de mesure - 16. Bouteille de niveau - 17. Pipette d'absorption.

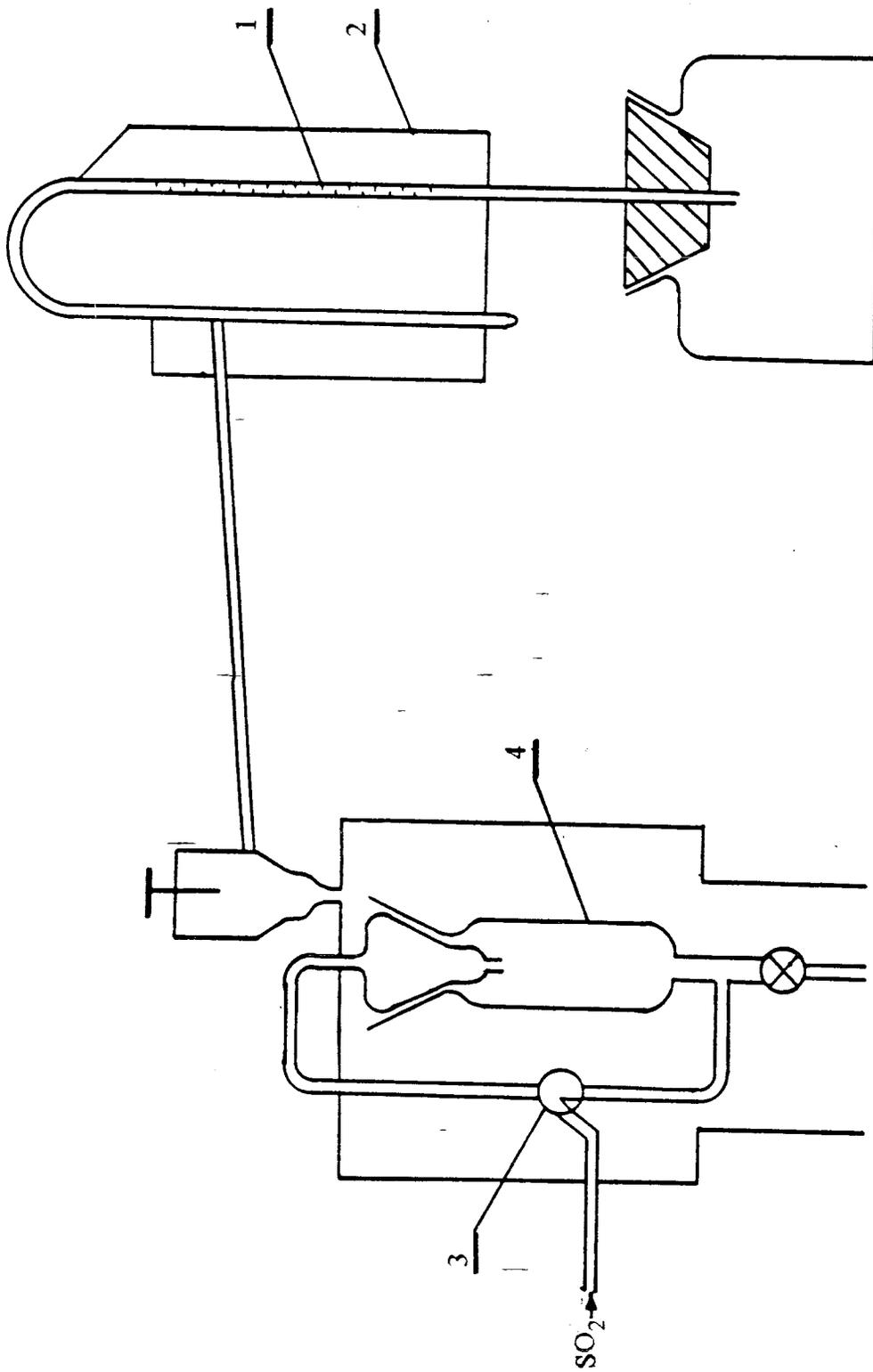


Fig. 18 - Complément du dispositif de détermination du soufre

1. Burette
2. Fixateur de la burette
3. Robinet à trois voies
4. Chambre d'absorption.

IV.2.b. Détermination du Silicium

On utilise la méthode gravimétrique qui consiste à attaquer un (01) gr d'échantillon avec trois cent (300) ml de HCL et quinze (15) ml H₂SO₄. Après chauffage jusqu'à l'évaporation de SO₃, on laisse bouillir et on filtre le contenu avec un filtre moyen. Le produit filtré ainsi obtenu est lavé avec H₂O et HCL à chaud, on laisse sécher puis on calcine finalement pendant trente (30) mn dans un four à moufle à une température de mille cent (1100°C), on laisse refroidir et on pèse.

Le pourcentage du Silicium est calculé d'après la formule suivante:

$$\% \text{ Si} = \frac{(b-c) \cdot 0,46744 \cdot 100}{E}$$

- E pesée en grammes (gr) après calcination
- b pesée de la capsule avec contenu
- c pesée de la capsule vide

IV.2.c. Détermination du Phosphore

On attaque 0,5 gr d'échantillon avec cinquante (50) ml de HNO₃ dans un bêcher de deux cent cinquante (250) ml au cours de la dissolution, on ajoute beaucoup de H₂O, après on oxyde avec vingt cinq (25) ml de KMnO₄ et laisser bouillir pendant dix (10) mn, puis on réduit en ajoutant quelques gouttes de NaNO₂ et on laisse bouillir le filtrant. On rajoute vingt (20) ml de NH₄NO₃ et on chauffe jusqu'à 60°, après addition de cinquante (50) ml de (NH₄)₆MO₇O₂₄4H₂O (Molybdate d'ammonium) on agite et on laisse déposer pendant trente (30) mn, on filtre et on lave puis on ajoute cinq (05) à vingt (20) ml de NaOH à 0,2N, on agite jusqu'à la dissolution du précipité jaune et on ajoute quelques gouttes de phénolphtaleine et la solution vire au rouge.

Après, on titre l'excès de NaOH à 0,2N au moyen de H₂SO₄ à 0,2N et la solution devient incolore.

Le pourcentage de Phosphore est déterminé d'après la formule suivante:

$$\% P = \frac{(b-c) \cdot 0,00027 \cdot 100}{E}$$

- b quantité utilisée de NaOH à 0,2N en ml
- c quantité de H₂SO₄ à 0,2N utilisée
- E pesée en (gr)

IV.2.d. Détermination du Manganèse

On attaque 0,3 gr d'échantillon avec cinquante (50) ml de HNO₃ puis on chauffe. Après dégagement complet des gaz nitreux de couleur marron, on reprend avec vingt cinq (25) ml de AgNO₃ et deux (02) gr de (NH₄)₂S₂O₈ puis on ajoute vingt cinq (25) ml de NaCl, on agite et on filtre avec de l'acide arsénique et on pèse.

Le pourcentage de Manganèse est déterminé d'après la formule suivante:

$$\% Mn = \frac{\text{Quantité d'acide arsénique utilisée} \cdot 0,000329 \cdot 100}{E}$$

E: Pesée en (gr)

IV.3. Analyse des paramètres mécaniques

Pour les essais mécaniques, on a solidifié deux (02) groupes d'échantillons chacun en comporte trois (03) barreaux dans deux (02) noyaux en sable durci au CO₂, servant de moule de composition suivante: 93,0 - 95,0 % en poids de sable silicieux et 5,0 - 7,0 % de verre soluble.

Ces barreaux de trente cinq (35) mm de diamètre et trois cent (300) mm de longueur ont été coulés à la température de 1350°C.

Pour étudier l'influence de l'inoculant sur la microstructure, le deuxième groupe a été coulé avec addition de trois (03) kg de FeSi75 dans la poche.

IV.3.1. Mesure de la résistance à la traction

Après le tronçonnage et le tournage de ces barreaux, on obtient des éprouvettes aux dimensions suivantes: une longueur de deux cent cinq (205) mm pour vingt huit (28) mm de diamètre avec une gorge au milieu de vingt (20) mm (voir Fig.19) sur lesquels on exerce un effort de traction dirigé suivant l'axe. Lorsque après avoir passé la limite élastique, on continue à exercer une tension sur l'éprouvette, la contrainte passe par un maximum, pour décroître ensuite jusqu'à la rupture. Les valeurs sont représentées sur le tableau N°7.

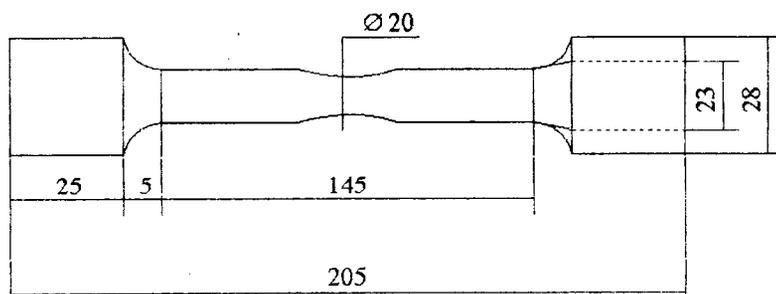


Fig.19. Epreuve de traction

IV.3.2. Mesure de la dureté

Les mesures de dureté sont d'une grande utilité à cause de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. La dureté caractérise la résistance à la déformation. Cependant le processus opératoire doit être très précis pour assurer la reproductibilité et la fidélité des résultats [6].

L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer. La charge étant constante et on mesure la dimension de l'empreinte. La dureté s'exprime par le rapport de la force sur la surface projetée de l'empreinte.

$$HB = \frac{F}{S}$$

Où : HB en (Kgf / mm²)

Dans notre cas, on a utilisé la presse BRINELL avec une charge constante de sept cent cinquante (750) kg et une bille de diamètre cinq (05) mm en acier trempé comme pénétrateur. Les valeurs de la dureté BRINELL et de la résistance à la traction sont indiquées sur le tableau ci-dessous.

N° de l'échantillon	σ_t (Kgf / mm ²)	HB (Kgf / mm ²)	type de fonte
1/1	16,2	207	Ft15
1/2	14,3	198	Ft15
1/3	14,7	198	Ft15
2/1	15,1	182	Ft15
2/2	15,0	187	Ft15
2/3	15,0	182	Ft15

Tableau N°7 Valeurs expérimentales de σ_t et HB

Pour pouvoir évaluer la dureté du produit obtenu (caractéristique principale pour les pièces travaillant à l'usure) nous avons prélevé sur plusieurs éprouvettes coulées au cours de la fusion des mesures de dureté d'après les méthodes Brinell et Rockwell. Les valeurs de ces duretés sont présentées sur le tableau 8.

L'évolution des duretés Rockwell et Brinell en fonction du taux de manganèse est mise en évidence graphiquement sur les figures 20 et 21. Quant à l'interaction existant entre elles, l'analyse de HB en fonction de HRC, elle est représentée aussi graphiquement sur la figure 22.

%Mn	HRC1	HRC2	HRC3	MOYHRC	HB1	HB2	HB3	MOYHB
0,94	21	20	18	19,66	156	150	143	149,66
0,97	22,5	17	16	18,5	148	161	148	152,33
1,04	21	20	20	20,33	150	155	156	153,66
1,09	22	20	23	21,66	156	161	150	155,66
1,12	28,8	18	21	22,60	155	170	156	160,33
1,18	21	25	26	24	161	170	155	162
1,25	21	25	27	24,33	187	170	154,92	170,64
1,30	29	30,64	15	24,88	178	194	148,20	173,40
1,35	24	27,5	25	25,5	156,94	187	187	176,98
1,45	27,5	27,5	26,5	27,16	178	194	167,52	179,84
1,50	27	27	32,32	28,44	182,84	194	178	184,28
1,70	26	27	34	29	166,80	207	198	190,60
2,05	29	25	33,5	29,16	183	207	198	196,00
2,10	32	32,60	29	31,20	190	207	198	198,33
2,25	31,5	33,45	31,5	32,5	207	187	228	207,33

Tableau N°8 Variation des duretés Brinell et Rockwell en fonction de la teneur en Mn au cours de l'élaboration du matériau.

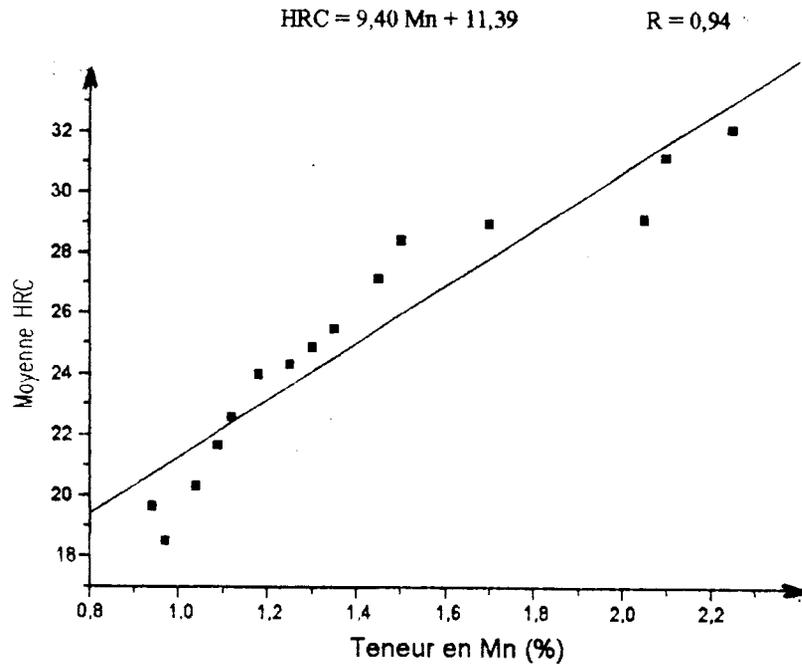


Fig.20 Variation de la dureté Rockwell en fonction de la teneur en Mn.

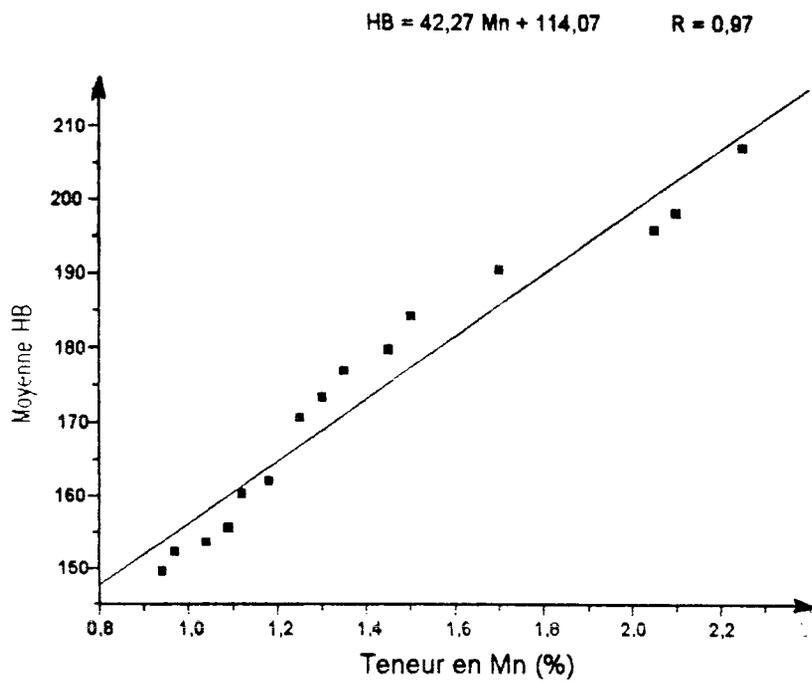


Fig.21 Variation de la dureté Brinell en fonction de la teneur en Mn

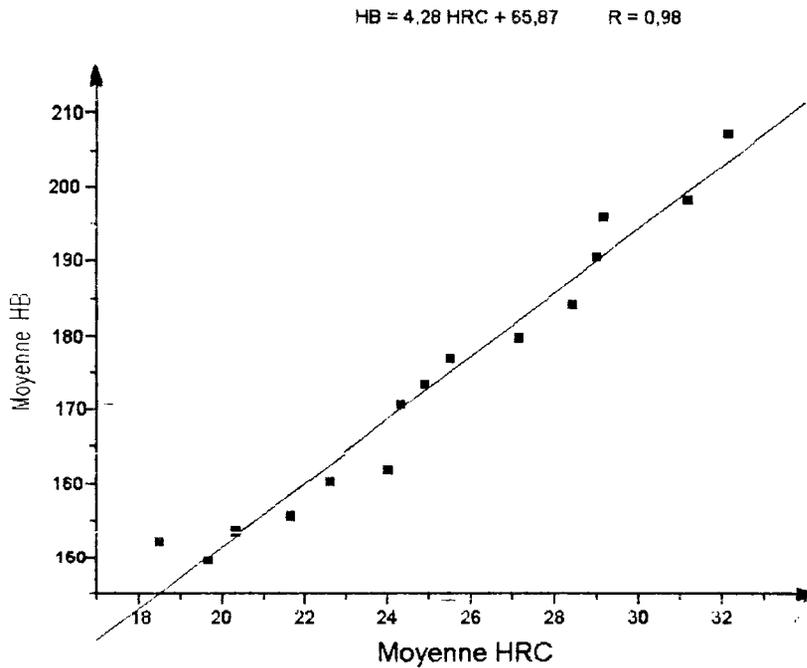


Fig.22. Corrélations entre les duretés Brinell et Rockwell

Il apparaît qu'elles varient d'une façon linéaire par rapport à ces échantillons; ce qui est dû à la variation de la teneur en manganèse au cours de la fusion. Le manganèse accroît la stabilité de la perlite et de la cémentite en formant un carbure mixte Fe_3C-Mn_3C où la présence de la cémentite manganésifère de grande stabilité et la formation de la ferrite améliorée. Ces résultats sont en accord avec ceux déjà connus [35].

Afin de déduire la corrélation entre ces deux méthodes, nous avons tracé le graphe N°22 (représentatif de HB en fonction de HRC) et dont l'équation de la regression est:

$$Y = 4,28 X + 65,87$$

où Y: mesure de la dureté Brinell (HB)

X: mesure de la dureté Rockwell (HRC)

Le coefficient de corrélation étant de 0,98

IV.4. EXAMENS MICROGRAPHIQUES

IV.4.1. Principe de la micrographie

La micrographie ou métallographie microscopique permet de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques (métaux purs, solutions solides, eutectiques...).

Cette technique consiste à examiner au microscopie par réflexion, une surface polie et attaquée chimiquement.

IV.4.2. Préparation des échantillons

Les barreaux solidifiés sont préalablement découpés transversalement avec une scie. Les surfaces des échantillons obtenus, sont soumises à l'abrasion de papiers couverts d'abrasifs de grosseur décroissante (180-600-1000). Les échantillons sont frottés successivement sur chacun des papiers jusqu'au papier le plus fin, le polissage étant effectué sur une polisseuse mécanique.

L'observation au microscope optique nécessitant un état de surface parfaitement poli, un polissage fin à la pâte diamantée est nécessaire pour donner à l'échantillon un polissage de finition. Cette opération a pour but d'éliminer toutes rayures visibles au microscope et d'obtenir une surface plane, réfléchissante, facilitant l'examen.

L'attaque chimique de cette surface polie, à l'aide du réactif suivant 5 % HNO_3 + $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ [16] permet de révéler la structure et d'en découvrir les éléments constitutifs.

Les attaques chimiques sont effectuées à température ambiante, et les temps d'attaque sont déterminés expérimentalement. Pour tous les échantillons, une immersion rapide dans le réactif, suivie d'un rinçage à l'eau, puis d'un séchage à l'air comprimé donne de bons résultats à l'examen micrographique.

IV.4.3. Examen au microscope optique

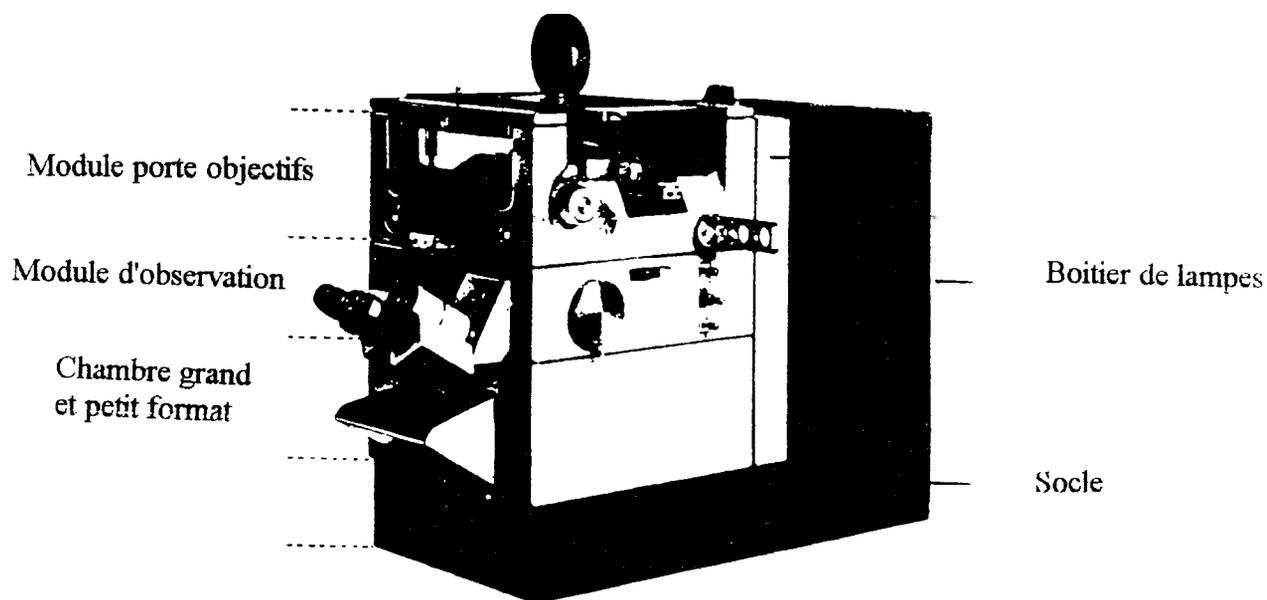
Une fois, la microstructure révélée, on effectue l'examen micrographique sur un microscope AXIOMAT IAC. Microscope inversé à lumière réfléchi avec chambre photographique pouvant grossir jusqu'à deux mille (2000) fois le sujet examiné.

Le microscope est constitué d'un objectif (système de lentilles à courte distance focale) qui donne de l'objet une première image réelle et agrandie, et d'un oculaire (système de lentille à distance focale plus grande) qui donne de l'image précédente, une image définitive agrandie, virtuelle ou réelle (oculaire de projection).

L'échantillon est supporté par une plate forme qui se déplace dans trois (03) directions perpendiculaires; le déplacement vertical sert à la mise au point, les deux autres mouvements servent à une exploration méthodique de l'échantillon.

La qualité d'un microscope est couramment défini par son grossissement, rapport du diamètre apparent de l'image fournie par l'instrument au diamètre apparent de l'objet vu à l'oeil nu. Au cours de l'observation photographique, on utilise le grandissement de l'appareil (rapport des dimensions linéaires de l'image et de l'objet).

Le grandissement s'obtient en faisant le produit du grandissement de l'oculaire. L'éclairage se fait par réflexion avec une lampe à incandescence à filament gros et court, fonctionnant à basse tension (12v). La surface éclairée est brillante et l'éclairage est dit à fond clair. C'est la méthode la plus classique utilisée pour l'observation des métaux au microscope métallographique. Elle permet de voir les grains d'un métal, pour connaître la composition de l'échantillon et les proportions des composants. Dans cette méthode, l'éclairage est perpendiculaire à la surface et les rayons sont donc réfléchis perpendiculairement. Les grains lisses apparaissent en clair, alors que les frontières (ou joints), qui sont des interruptions dans la surface lisse, sont foncés. Ils sont donc plus visibles et permettent d'apprécier la taille des grains. Par contre, les parties sombres sont trop foncées pour révéler leurs détails.



AXIOMAT IAC

Microscope inversé à lumière réfléchie avec chambre photographique

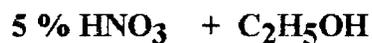
IV.4.4. Etude de la microstructure

La fonte d'affinage d'EL HADJAR sous forme de gueuse de cinq (05) kg a servie à la préparation de la fonte grise Ft15. L'élaboration est effectuée dans un premier temps au four rotatif puis le métal liquide ainsi obtenu est transféré au four électrique. Après démanganisation, nous coulons le métal dans des noyaux en sable servant de moules.

IV.4.4.1. Etudes micrographiques

IV.4.4.1.a. Mode opératoire

Les barreaux obtenus ont été étudiés au microscope optique; pour cela, nous avons découpé des échantillons à l'aide d'une scie, nous avons poli les surfaces des sections obtenues par les procédés qui ont été décrits précédemment. Les échantillons sont lavés à l'eau puis séchés à l'air comprimé, ensuite attaqués chimiquement par le réactif suivant



Nous avons obtenu de bons contrastes qui ont facilité l'observation de la microstructure (voir micrographies ci-après).

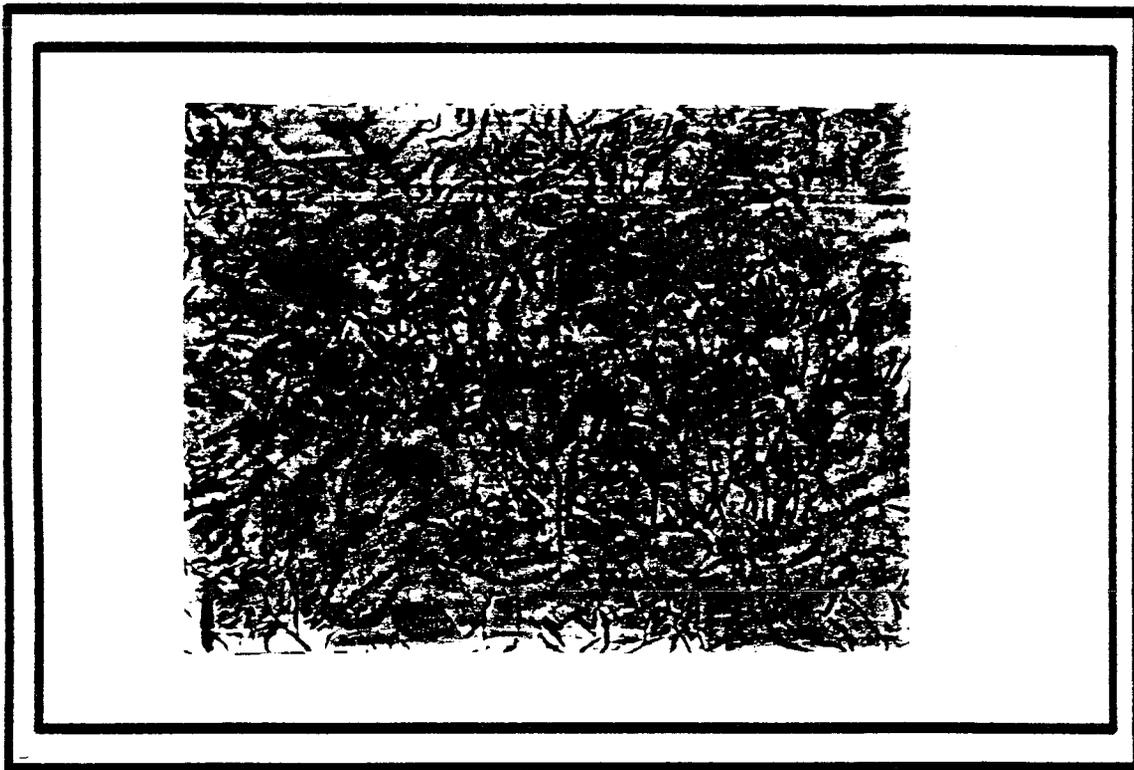


Photo 1 Echantillon de diamètre 32 mm . Photo prise au centre x 500.
Présence de ferrite 1%-5% et de 10%-15% de graphite de type en rosette
Longueur des lamelles 40 à 120 μm . Répartition plus régulière au bord.
Structure perlitique .

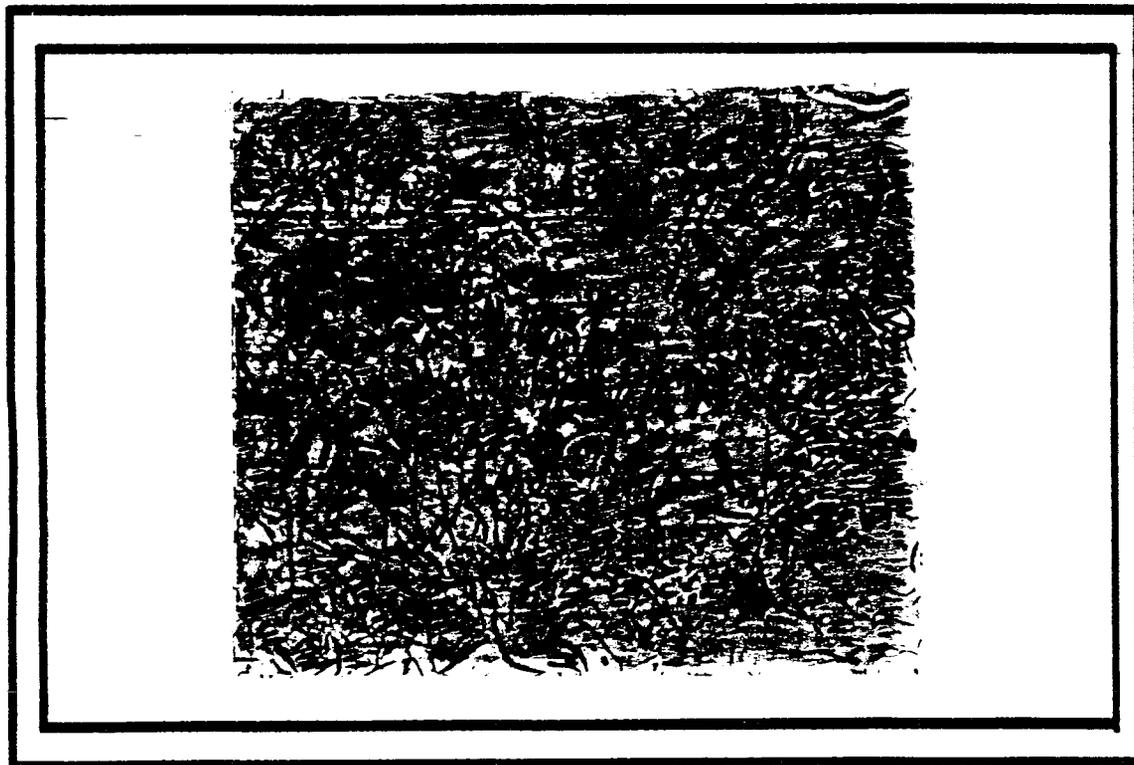


Photo 2 Même échantillon ,photo prise à l'extrémité x500..



Photo 3 Echantillon de diamètre 32 mm, sans attaque chimique .

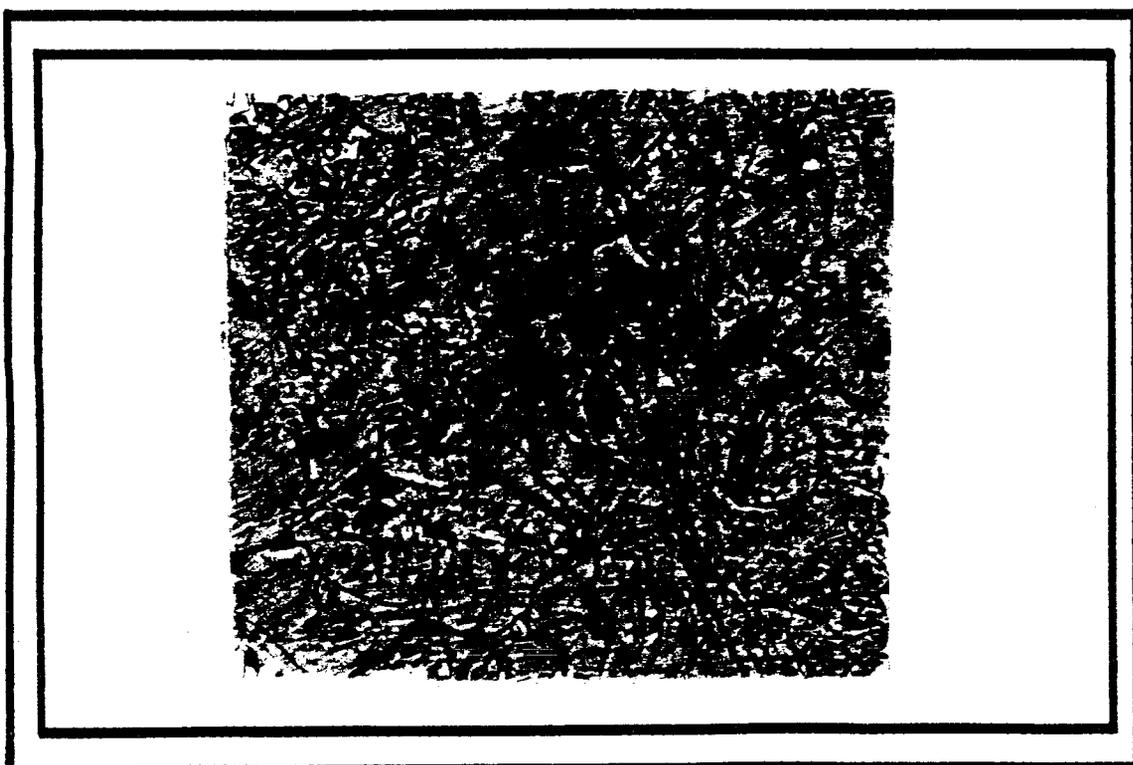


Photo 4 Echantillon de diamètre 32 mm . Photo prise au centre x 500 .
Coulé après inoculation par FeSi75 dans la poche. Photo prise au centre x 500 .
Présence de ferrite 1%-5% et de 10%- 15% de graphitede type en rosette élargie
du centre vers l'extérieur. Répartition régulière. Structure perlitique.

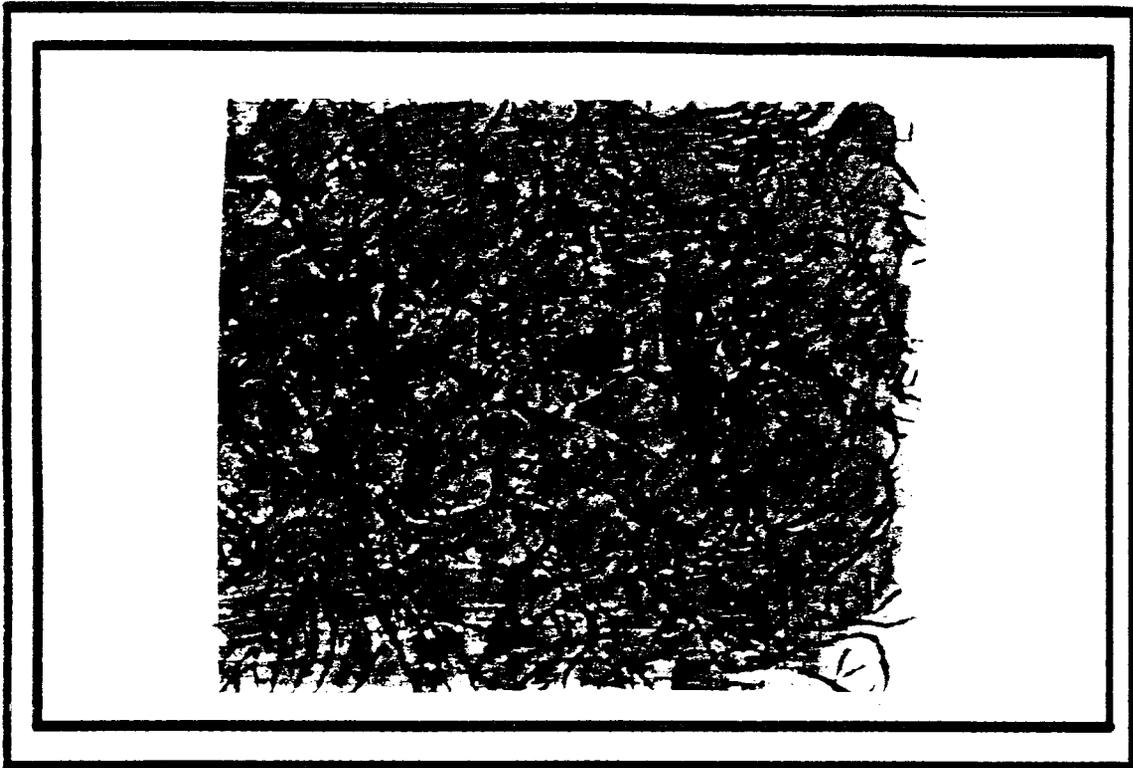


Photo 5 Même échantillon, photo prise à l'extrémité x 500 .

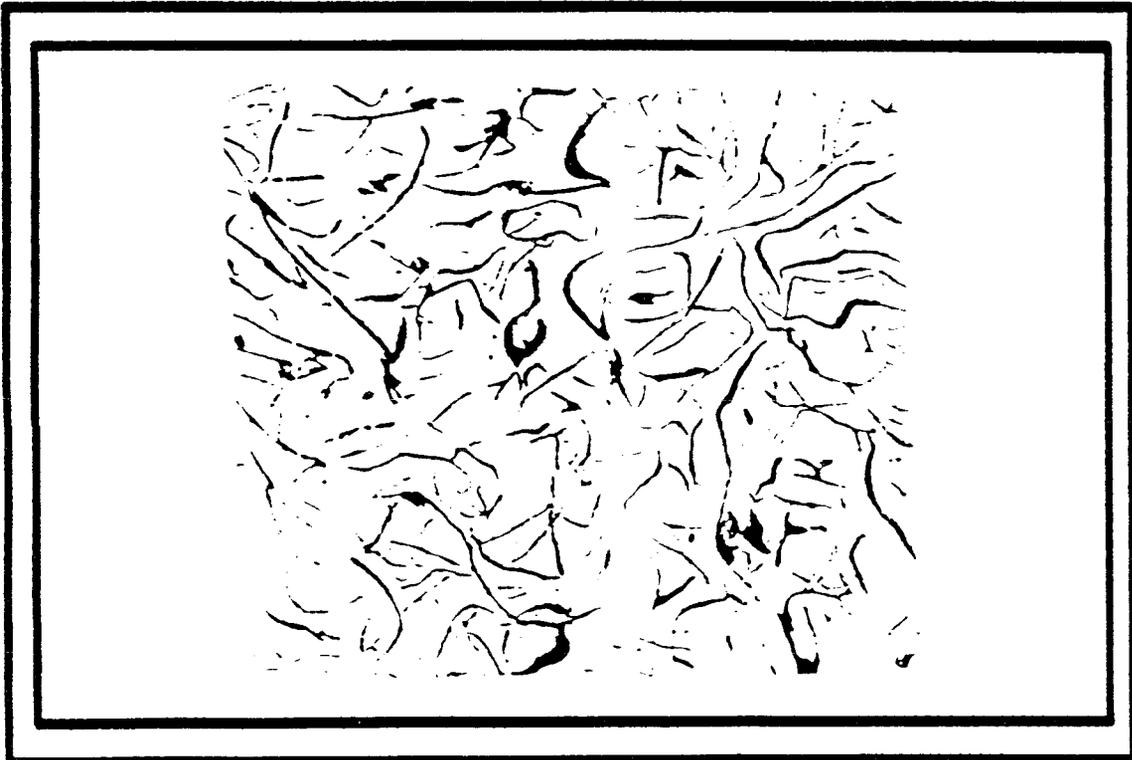


Photo 6 Echantillon de diamètre 32 mm.
Après inoculation par FeSi75, sans attaque chimique.

IV.4.4.1.b. Analyse de la microstructure après correction et inoculation

Les micrographies N°1, 2 et 3 montrent les microstructures observées sur les échantillons prélevés sur des barreaux normalisés coulés à la température 1392° après correction de la composition chimique de la fonte par addition de FeSi75 et du Carbone dans le four à arc électrique. Ces microstructures montrent une répartition régulière du graphite au bord, la présence de 10 - 15 % de graphite dans la matrice et 1 - 5 % de ferrite. La forme du graphite est du type B (graphite en rosette) avec des traces de cémentite < 1%.

Les micrographies N°4, 5 et 6 montrent les microstructures observées sur des échantillons prélevés sur des barreaux coulés à la température 1392° après addition de trois (03) kg de FeSi75 dans la poche de coulée. On remarque que la répartition est devenue plus régulière du centre vers l'extérieur avec une présence de 10 - 15 % de graphite dans la matrice et 1 - 5 % de ferrite. La forme du graphite est du type B (graphite en rosette) et des traces de cémentite.

IV.5. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA STRUCTURE DES PIÈCES

Les fontes étant, par définition, des alliages à carbures ou à carbone libre insoluble et non corroyés, toutes leurs caractéristiques dépendent à la fois de leur macrostructure primaire (dendrites, cellules, réseaux, graphite) et de leur microstructure, puis des incidences de la première fusion sur la seconde [35].

La fonte ayant servi aux essais donnait à l'analyse

% C	% Si	% Mn	% P	% S
-----	-----	-----	-----	-----
3,77±0,04	2,26±0,03	0,94±0,02	0,06±0,0002	0,013±0,03

Les jets de diamètre 5, 10, 20, 30, 40 mm et de longueur 300 mm coulés à la température 1350° dans un noyau servant de moule en sable de composition 95 - 93 % en poids de SiO₂ et 5 - 7 % de verre soluble. La figure N°23 montre la disposition des jets dans le moule.

Les photos ont été prises au centre et à l'extrémité de chaque échantillon prélevé sur les jets de façon à montrer la distribution et la répartition du graphite de l'extérieur vers l'intérieur.

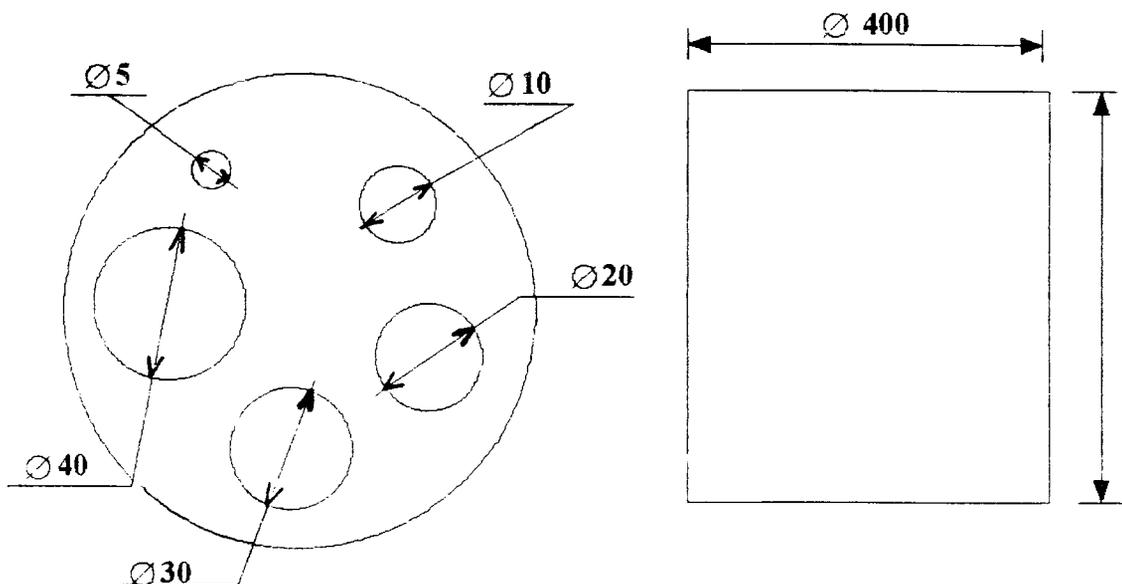


Fig. 23 Jets de différents diamètres



Photo 7 Echantillon de diamètre 5 mm x 500
Répartition interdendritique fine, longueur des lamelles 10 à 20 μm

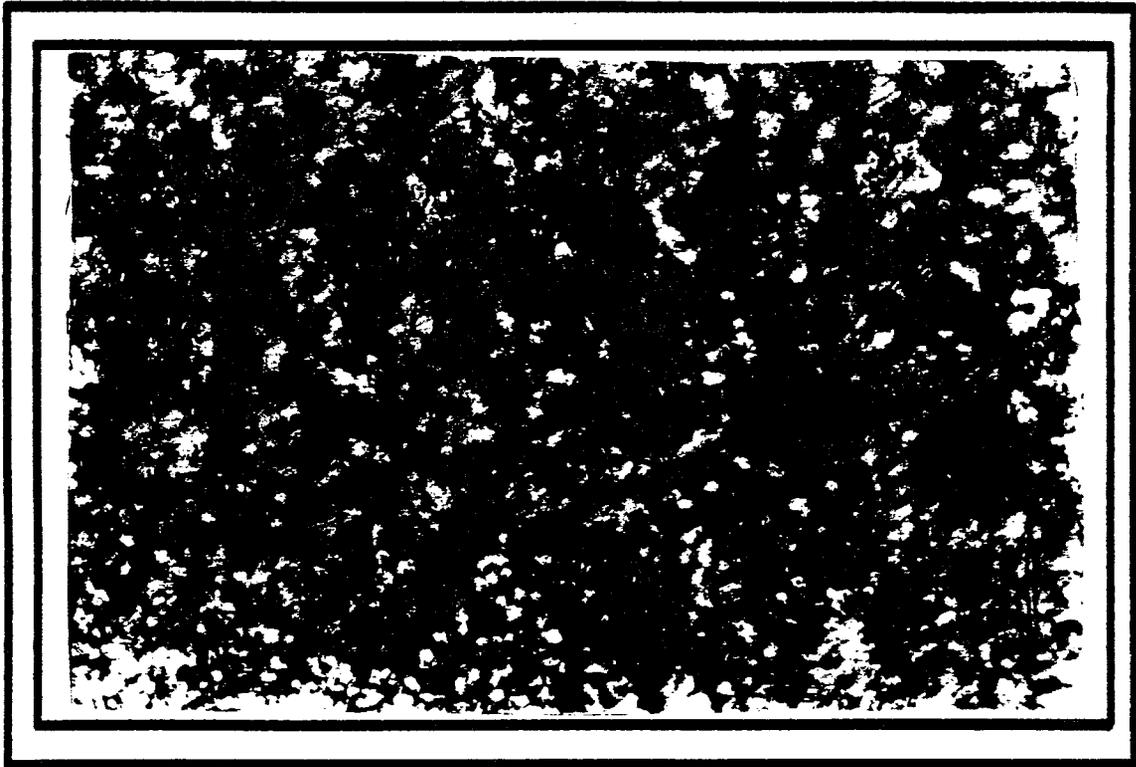


Photo 8 Echantillon de diamètre 10 mm.
Photo prise au centre x 500
Présence jusqu'à 5% de graphite dans la matrice.
Longueur des lamelles 10 à 40 μm . structure perlitique.

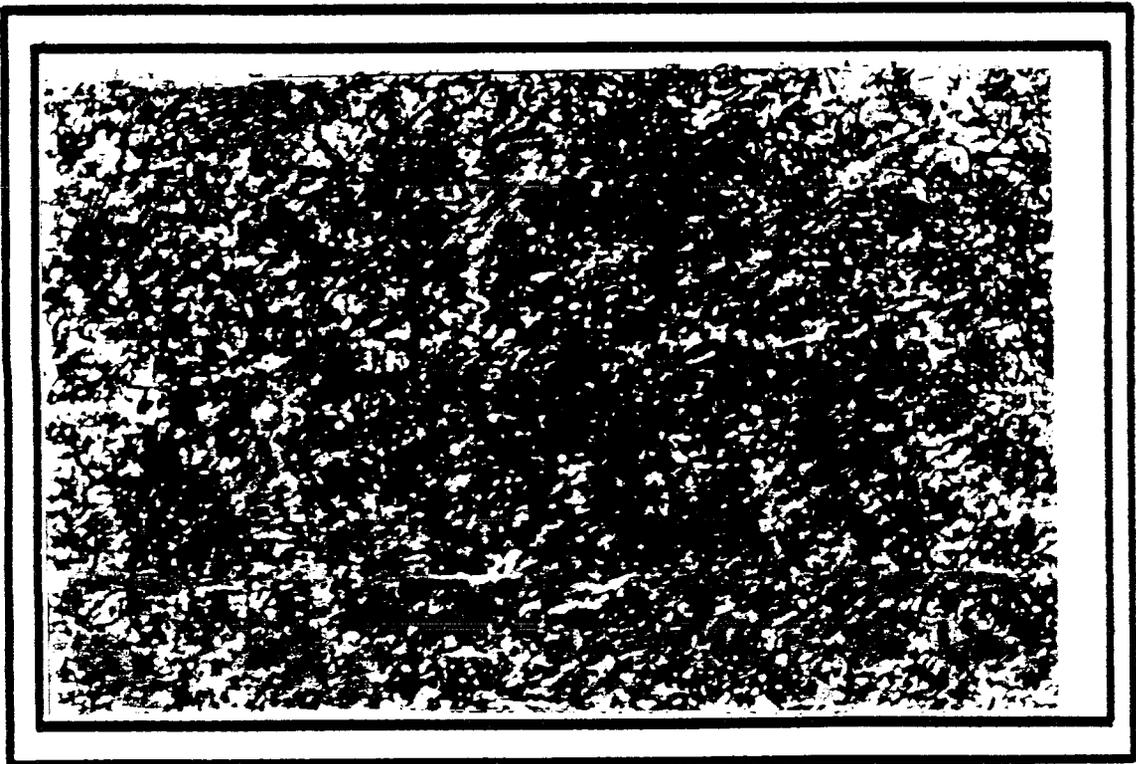


Photo 9 Même échantillon, photo prise à l'extrémité x 500.
Présence de ferrite < 1%; cémentite < 1%.
Répartition interdendritique fine .

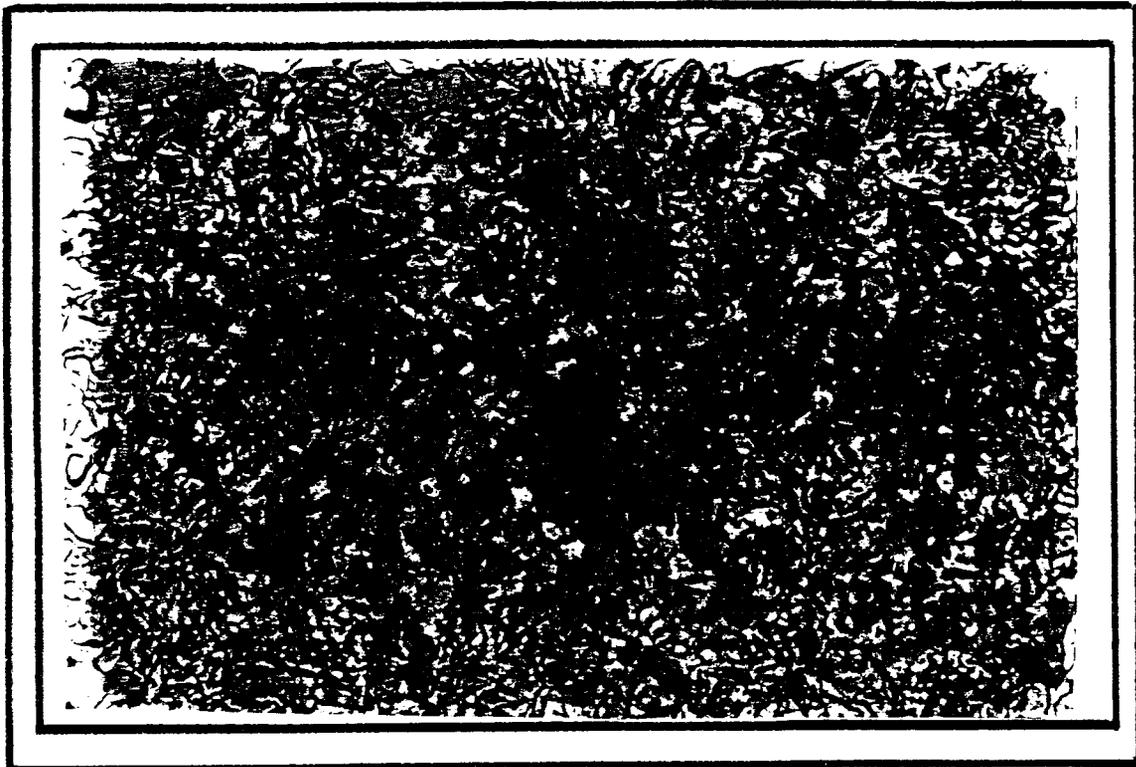


Photo 10 Echantillon de diamètre 20 mm.
 Photo prise au centre x 500.
 Présence de 10% - 15% de graphite en rosette de longueur
 40 à 250 μm dans la matrice. Ferrite 1% - 2%. Structure perlitique.

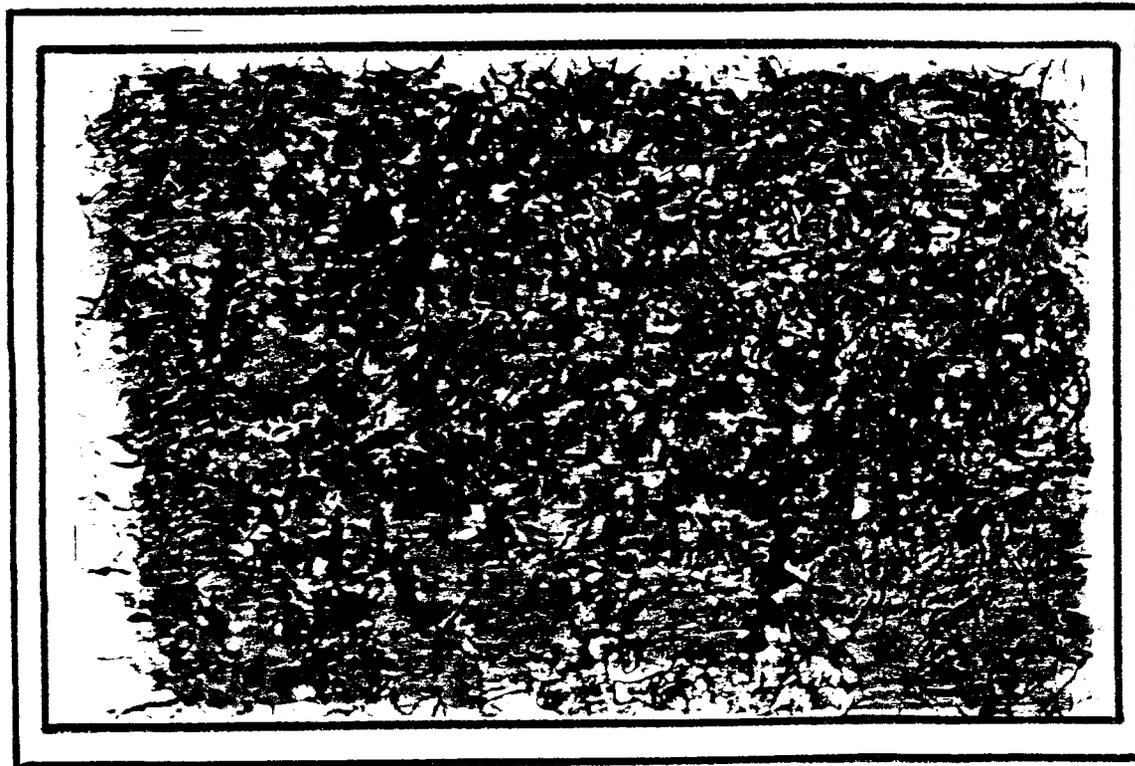


Photo 11 Même échantillon. Photo prise à l'extrémité x500.
 Présence de 1% - 2% de ferrite et cémentite < 1% . Longueur des lamelles
 de graphite 10 à 40 μm Répartition régulière.

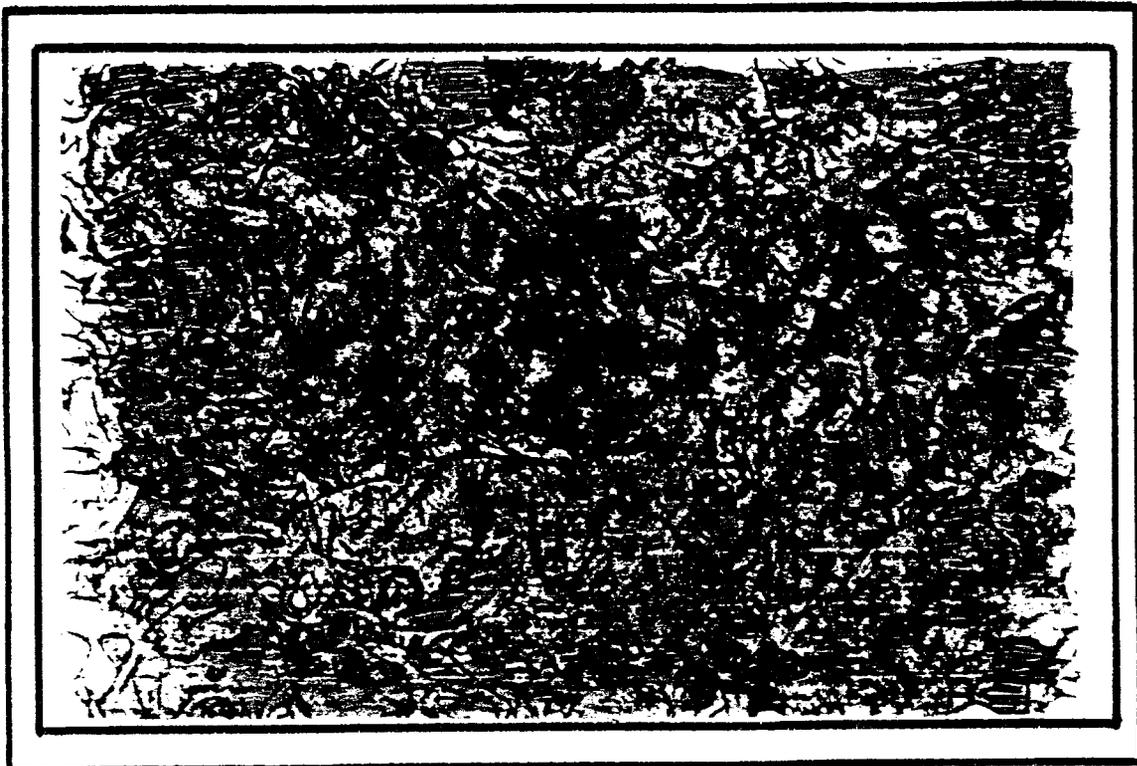


Photo 12 Echantillon de diamètre 30 mm, photo prise au centre x 500.
Présence de 3% - 5% de ferrite et 15% de graphite en forme de rosette
de longueur 40 -250 μm . structure perlitique.

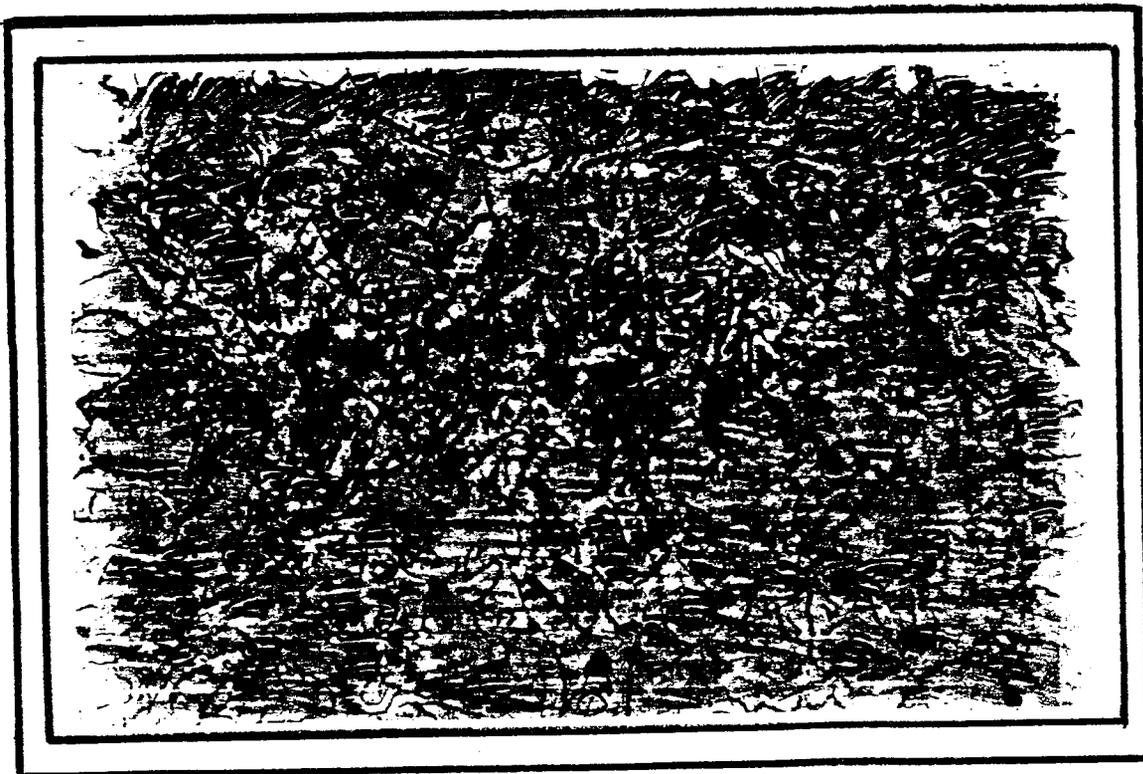


Photo 13 Même échantillon, photo prise à l'extrémité x500.
Présence du graphite en forme de rosette de longueur 25-250 μm .



Photo 14 Echantillon de diamètre 40 mm, photo prise au centre x 500.
Présence de ferrite 3% - 5% et de 15% de graphite dans la matrice.
Longueur des lamelles 40 à 250 μm . Structure perlito-perlittique.



Poto 15 Mêmes échantillon, photo prise à l'extrémité x 500.
Graphite dans la matrice 10% à 15%. Longueur des lamelles 25 à 250 μm . Cementite <1%. Répartition régulière. Ferrite <1%

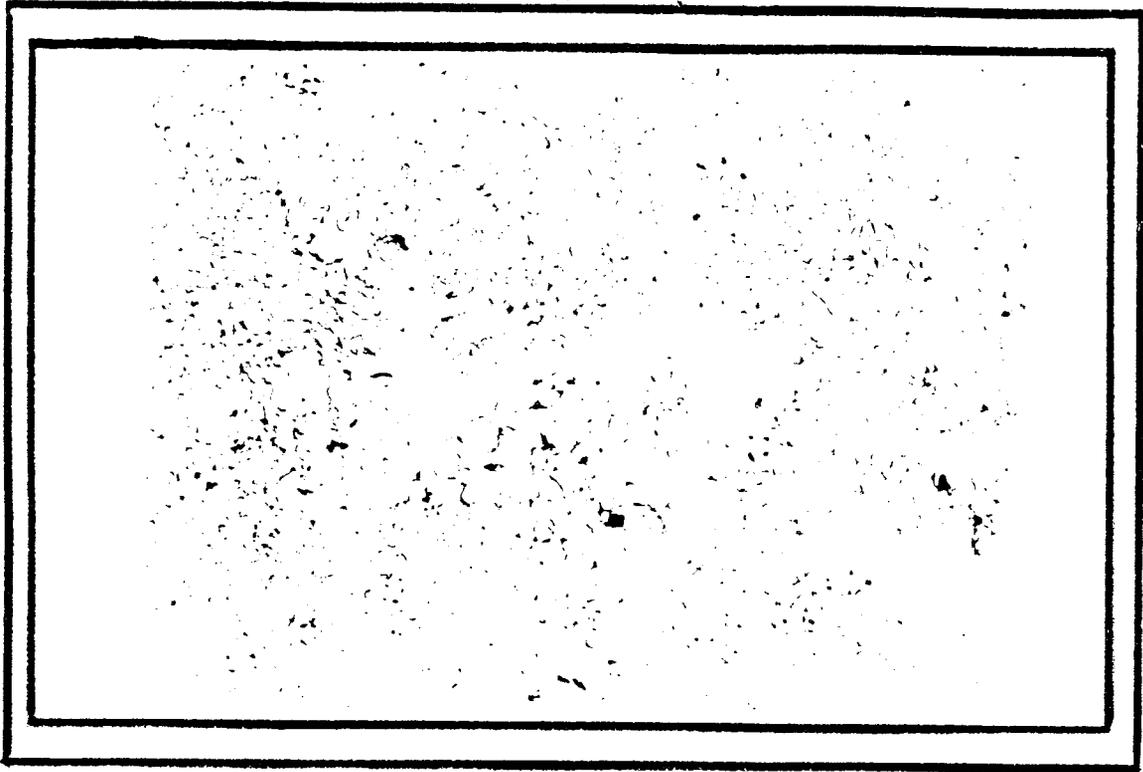


Photo 16 Echantillon de diamètre 5mm.



Photo 17 Echantillon de diamètre 10 mm au centre x 500.

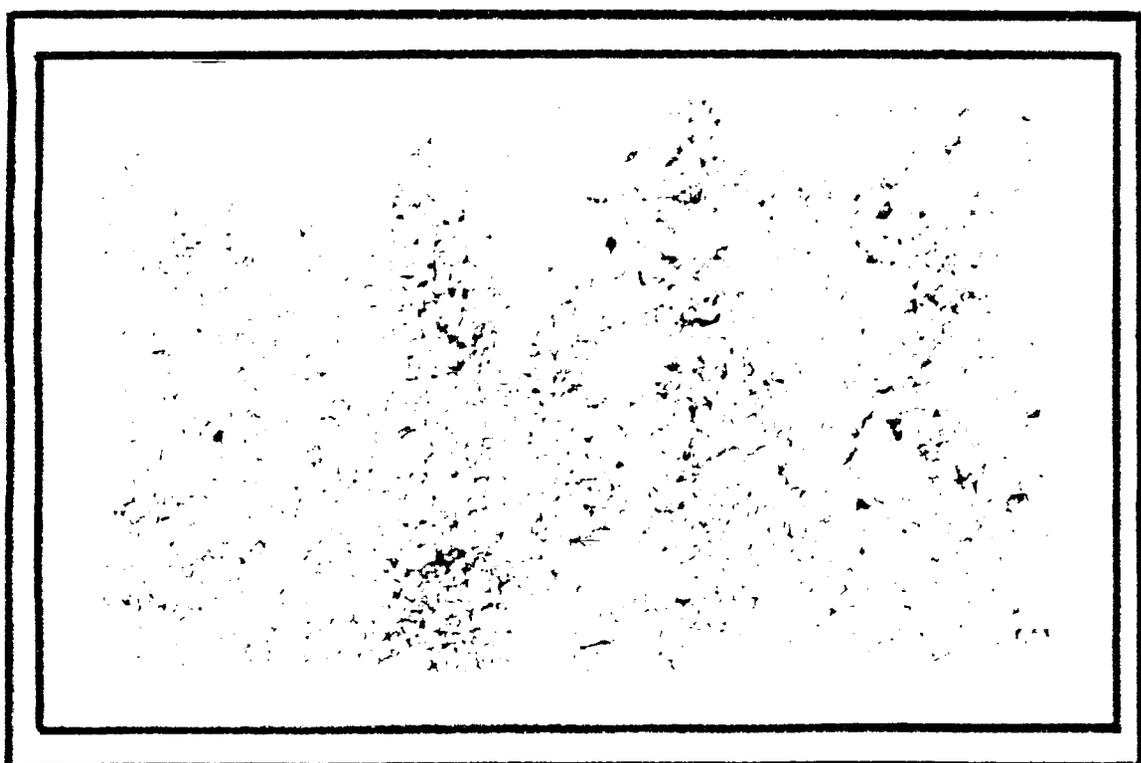


Photo 18 Echantillon de diamètre 10mm à l'extérieur x 500.



Photo 19 Echantillon de diamètre 20mm au centre x 500.

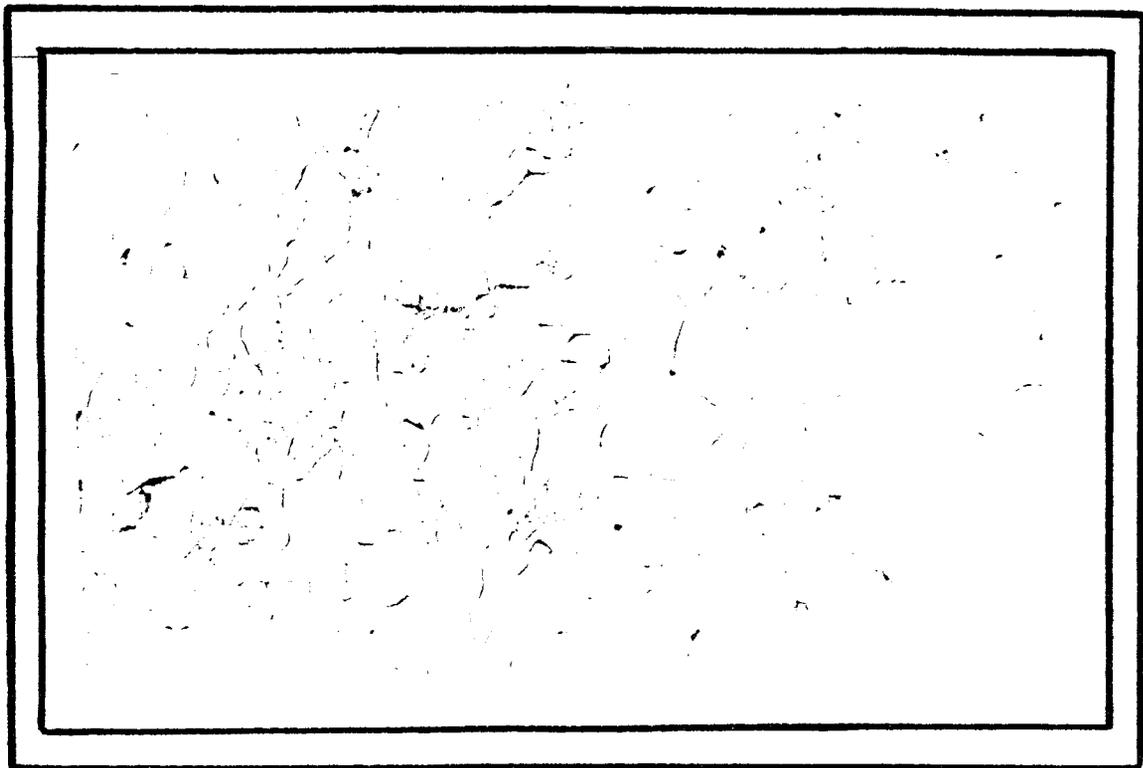


Photo 20 Echantillon de diamètre 20 mm à l'extérieur x 500.

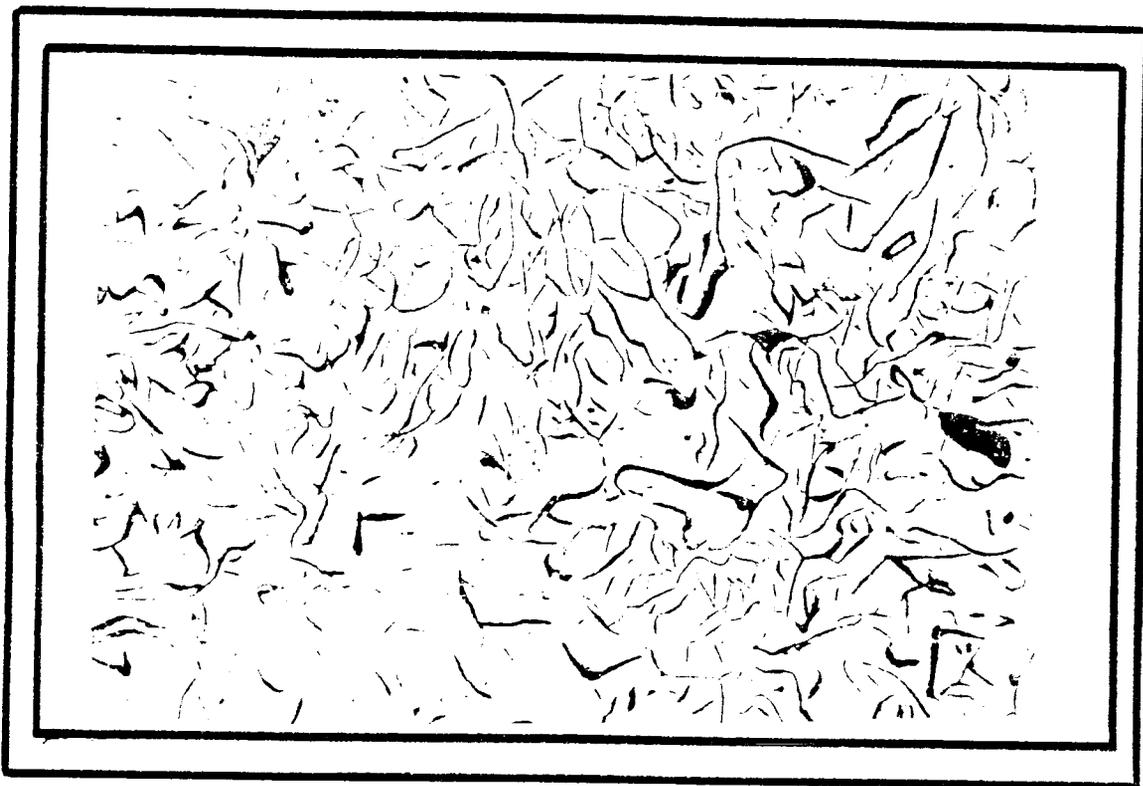


Photo 21 Echantillon de diamètre 30 mm au centre x 500.



Photo 22 Echantillon de diamètre 30 mm à l'extérieur x 500.



Photo 23 Echantillon de diamètre 40 mm au centre x 500

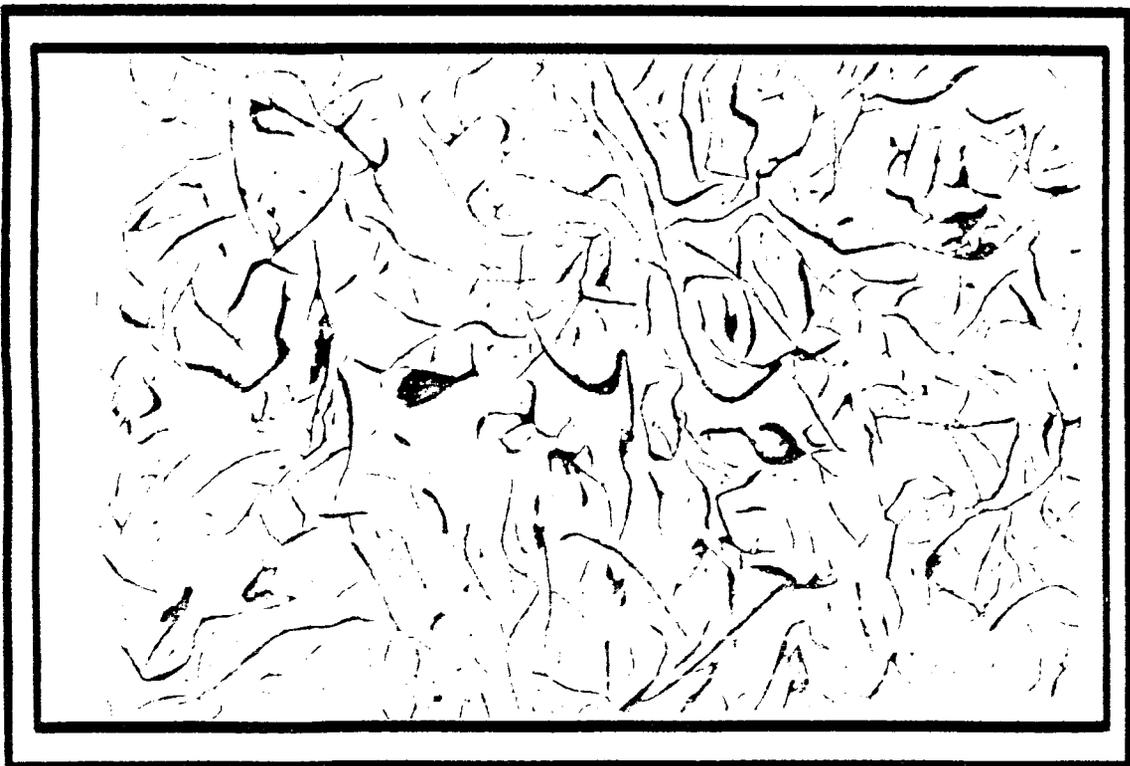


Photo 24 Echantillon de diamètre 40 mm à l'extérieur x 500

IV.5.1. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE DES ECHANTILLONS DE DIFFERENTS DIAMETRES

Les micrographies N° 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 et 15 montrent les microstructures observées sur ces échantillons qui sont caractérisés par une structure. On remarque que pour les échantillons de diamètre 5 et 10 mm, la répartition du graphite est interdendritique avec des lamelles très fines de 10 à 15 μm localisées entre les dendrites γ à cause du refroidissement rapide (au contact avec les parois du moule).

Pour les échantillons de diamètre 20, 30 et 40 la répartition du graphite en forme de rosette est régulière de l'extérieur vers l'intérieur avec des lamelles de longueur 10 à 250 μm pour le premier échantillon et 25 à 250 μm pour les deux derniers.

Les micrographies N°16, 17, 18, 19, 20, 21 et 22 montrent les microstructures observées sur les mêmes échantillons sans attaque chimique. Dans ce cas, le graphite apparaît en noir après polissage sans attaque, parcequ'il est arraché superficiellement et que la cavité résultante ne réfléchit plus la lumière.

L'alliage élaboré possède une microstructure caractérisée par une structure perlitique avec la présence de 1 - 5 % de ferrite dans la matrice et des traces de cémentite dues au Manganèse, comme tous les éléments qui diminuent la température eutectique, se rassemblent dans le métal qui reste liquide en dernier; c'est à dire aux limites de cellules eutectiques. Comme il augmente la stabilité de Fe_3C en s'y associant sous forme de Mn_3C , sa ségrégation a pour effet de maintenir sur le pourtour des cellules un réseau à structure perlitique. La largeur de ce réseau augmente avec la teneur en Manganèse. En outre, la graphite forme dans chaque cellule une rosette mais l'intérieur des cellules est encore ferritique. La dureté de l'ensemble passe de 121 à 197 quand la teneur en Manganèse passe de 0,10 à 1,20 % [35].

IV.6. COMPORTEMENT DU MATERIAU A L'USURE

L'usure est la cause principale de détérioration des pièces des machines en général et particulièrement celles du textile. Ces machines comportent un très grand nombre de points de frottement (paliers à glissement, coulisseaux, pistons, glissières, cames...). La série d'essais à l'usure nous a permis d'établir une qualification du matériau élaboré.

Cette étude a été entamée en vue d'une éventuelle utilisation de ce matériau comme élément de frottement et pour une acquisition d'une part de marché. Aussi, elle servira de contrôle des paramètres physico-mécanique obtenu précédemment sur ce produit.

IV.6.1. GENERALITES SUR L'USURE

Sachant que l'usure est la perte superficielle de substance d'un corps frottant, causée par action mécanique ou physico-chimique. Du point de vue mécanique, ce phénomène est représenté par la courbe ci-dessous, montrant l'intensité d'usure en fonction du temps.

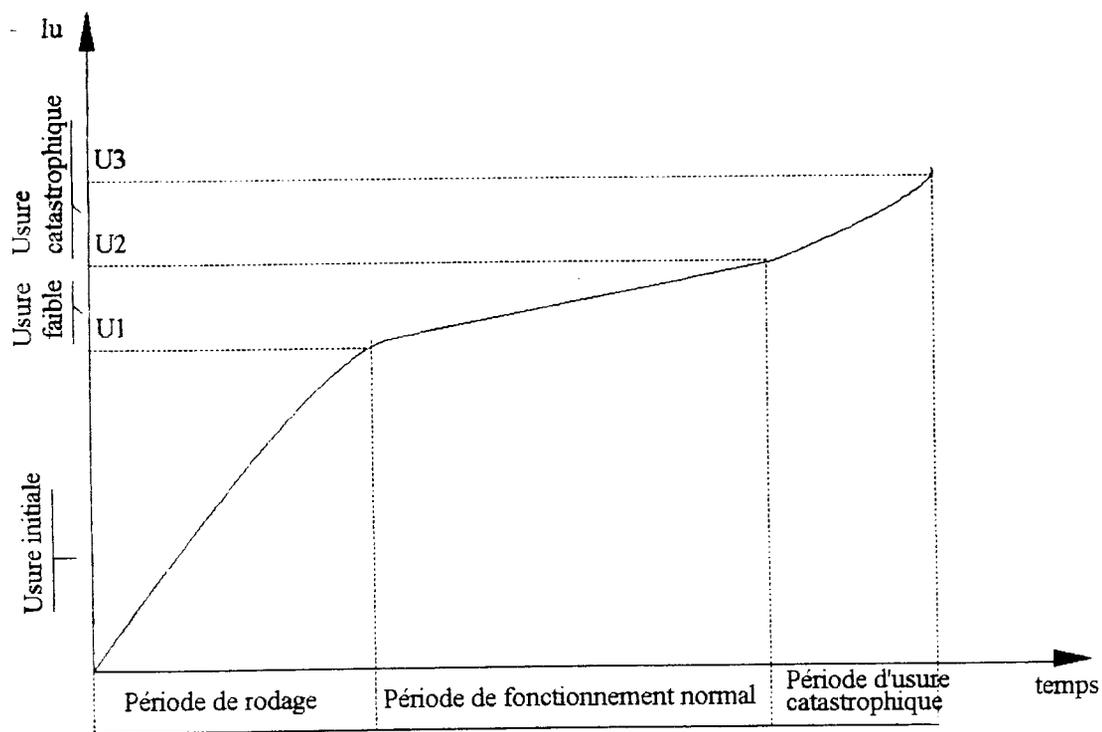


Fig.24 Courbe d'usure

Pendant la période de rodage l'usure se fait très rapidement, à vitesse régulièrement décroissante. Il est nécessaire de prendre les précautions suivantes:

- Surveiller l'échauffement
- La charge appliquée doit augmenter progressivement
- La vitesse de fonctionnement doit être progressive
- Le lubrifiant doit être propre et sous forme d'un film d'épaisseur optimale

Au cours de la période de fonctionnement normale, l'usure est presque constante, c'est l'état qui correspond à la durée de vie d'un système. La période d'usure catastrophique se caractérise par une usure accélérée, et par des incidents de plus en plus graves jusqu'à la destruction du système [6, 37].

En général, ce phénomène s'articule autour de plusieurs facteurs dont les principaux sont: nature du matériau, surface de contact, condition de travail, etc...

En effet, les études des caractéristiques physico-chimique et mécanique montrent que la dureté du matériau joue un rôle capital dans le comportement à l'usure. Il y a lieu de rappeler que les matériaux devant subir un traitement permettant d'élever leur dureté, sont tributaires d'une utilisation rationnelle à l'échelle industrielle.

Par ailleurs, la tribologie met en évidence le rôle des surfaces de contact quant à leur adhésion lors de leur mise en service. Lors qu'un corps se déplace par rapport à un autre, il se produit une résistance au mouvement communément appelé friction. Elle est généralement attribuée à des interactions entre deux surfaces de contact.

A cet effet, on note que le mode d'exploitation des substrats est fonction des conditions de travail définies, à savoir la vitesse relative, la charge, la température, etc...[7, 34].

IV.6.2. ESSAIS A L'USURE

Les essais réalisés, au niveau du laboratoire mécanique de l'I.N.I.M. se résument à l'étude du comportement à l'usure en fonction du régime de travail. Ces expériences consistent uniquement à tester notre matériau élaboré (Ft15) au complexe pompes vannes de BERROUGHIA à base de la fonte d'affinage d'EL HADJAR.

La conception d'un banc expérimental, après plusieurs mises au point nous a permis d'entamer quelques séries d'essais relatifs à l'usure. Ce dispositif associé à un tour universel permet d'établir une gamme étendue d'expérimentation.

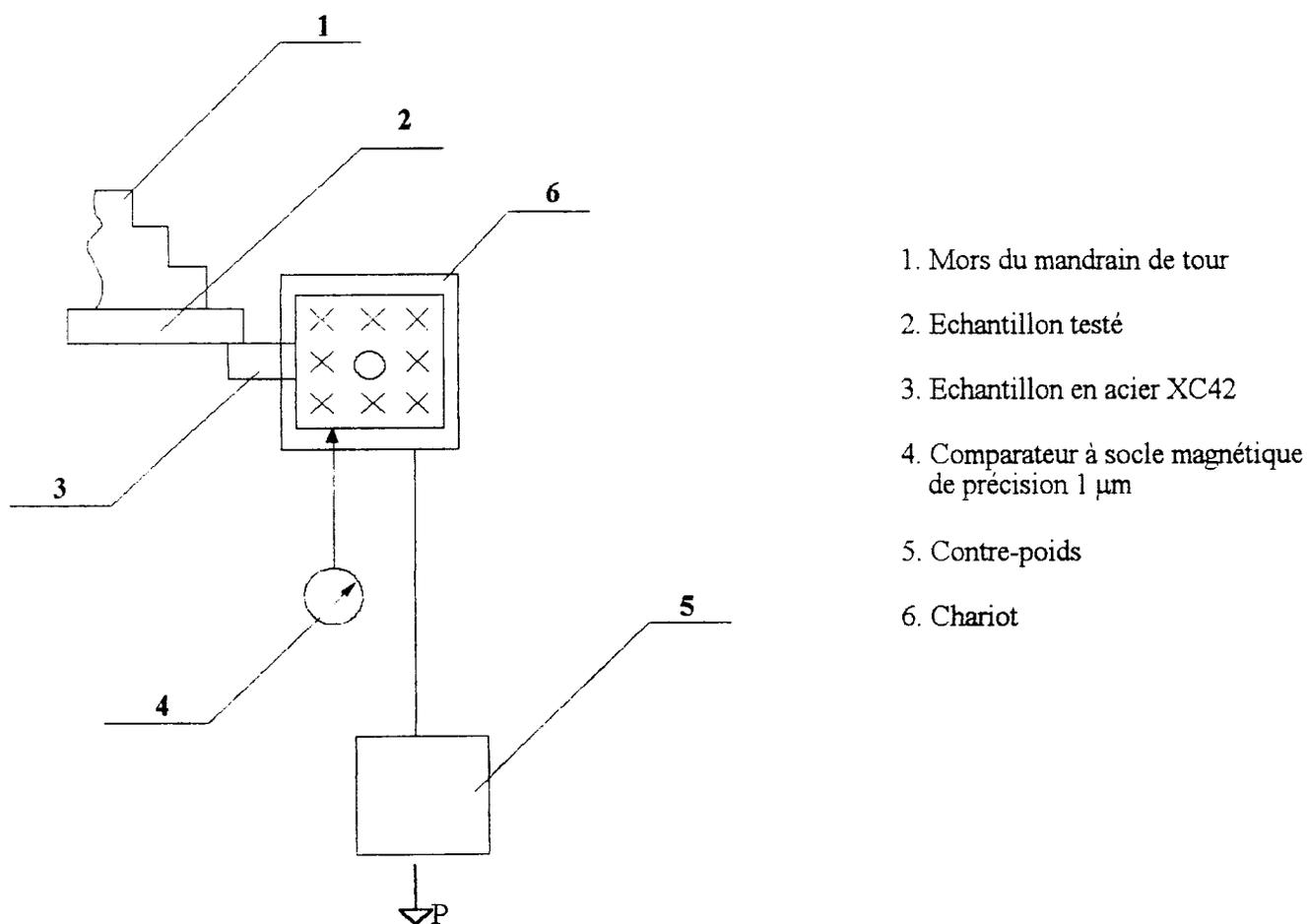


Fig.25. Schéma synoptique du banc d'essai d'usure

L'échantillon testé (2) est soumis à une rotation en plus d'une pression exercée par la pièce (3) en acier XC42. cette pression est transmise grâce au contre-poids (5) agissant sur le chariot libéré.

IV.6.3. PLAN D'EXPERIMENTATION

En général, les machines les plus répandues en industries manufacturières se composent d'organes travaillant dans des conditions voisines de celles arrêtées dans le tableau ci-dessous

N° d'ordre	Désignations des variables	Gamme de travail			
1	vitesse relative [tr/mn]	71	112	280	450
2	Surface de contact [mm ²]	20	40	80	-
3	Charge appliquée [Kg]	10	15	20	-

Tableau N°.9. Conditions expérimentales.

Lors de ces investigations, on a relevé la perte d'épaisseur de l'échantillon testé et ce, à des intervalles de temps constants.

Remarque:

Il est à noter que des manipulations complémentaires ont été prises en charge avec des gammes autres que celle arrêtées. Toutefois, celles-ci ont donné des résultats non significatifs confirmant ainsi le maintien des valeurs présentées précédemment.

IV.6.3.1. Influence de la vitesse relative à l'usure.

Pour chaque gamme de vitesses (les charges et surfaces de contact étant constantes), on procède par intervalle de quinze (15) secondes, au relevé des épaisseurs perdues par frottement. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous.

τ (s)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
n(t/mn)												
71	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
112	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
280	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
450	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tableau N°10. Variable d'étude: Vitesse relative.

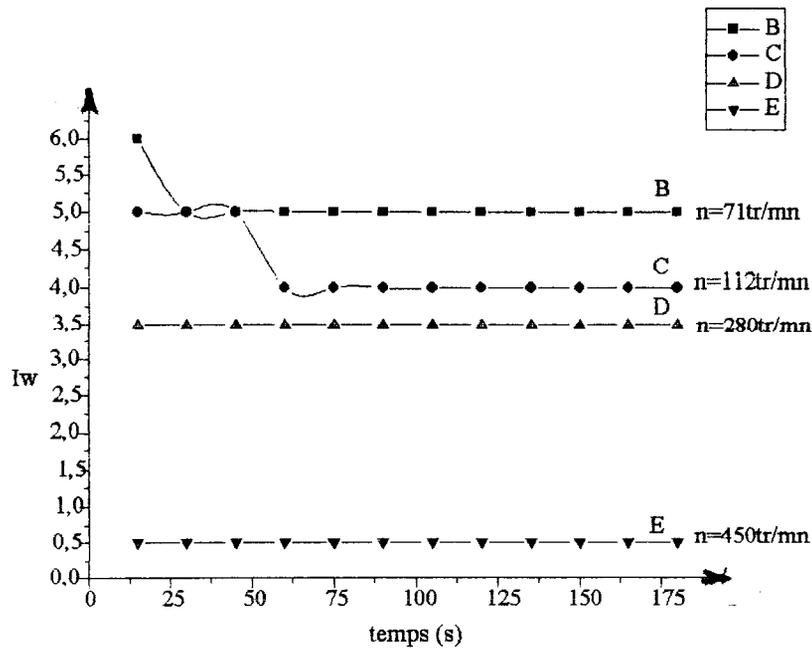


Fig.26. Evolution de l'usure en fonction du temps
Variable d'étude: vitesse relative.

Il apparait que cette perte d'épaisseur reste constante pour chacune de ces vitesses.

Toutefois, elle diminue lors de son augmentation et cette évolution est représentée graphiquement sur la figure 26.

IV.6.3.2. Influence de la charge appliquée.

Les essais ont été entamés d'une manière analogue à ceux effectués précédemment. Le seul paramètre varié est la charge appliquée, en revanche les autres facteurs conditionnant les essais restent sans changement. Les résultats sont portés dans le tableau 11 et représentés graphiquement sur la figure 27.

τ (s)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Charge (kg)												
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
20	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Tableau N°11. Variable d'étude: Charge appliquée.

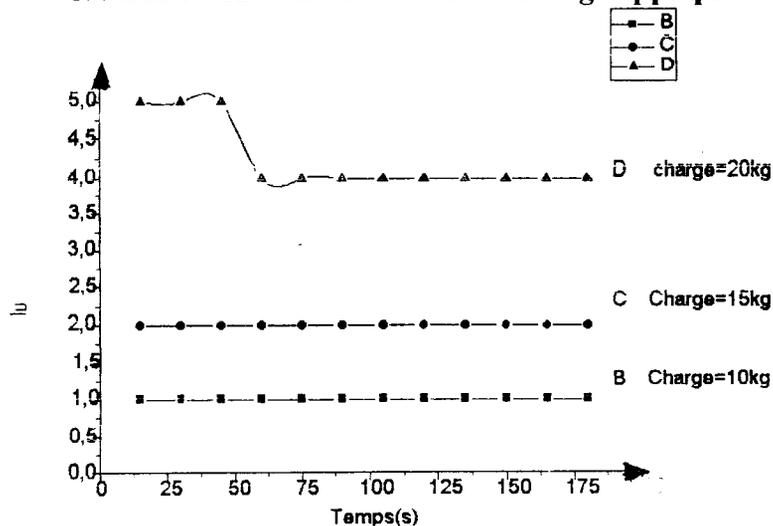


Fig.27. Evolution de l'usure en fonction du temps
Variable d'étude: Charge appliquée.

On constate également que la perte de matière en fonction du temps reste stable pour chacune des charges envisagées. Toutefois, on note un accroissement sensible de ce phénomène lors de l'augmentation de la dite charge.

IV.6.3.3. Influence de la surface de contact

La méthodologie est toujours sans changement par rapport aux deux cas précédents: on varie les surfaces de contact et on relève pour chacune de ces valeurs, l'épaisseur du matériau enlevé par friction. Les résultats de cette troisième série d'essais sont portés dans le tableau 12 et illustrés par la figure 28.

τ (s)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Surface (mm ²)												
20	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
40	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
80	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75

Tableau N°12. Variable d'étude: Surface de contact.

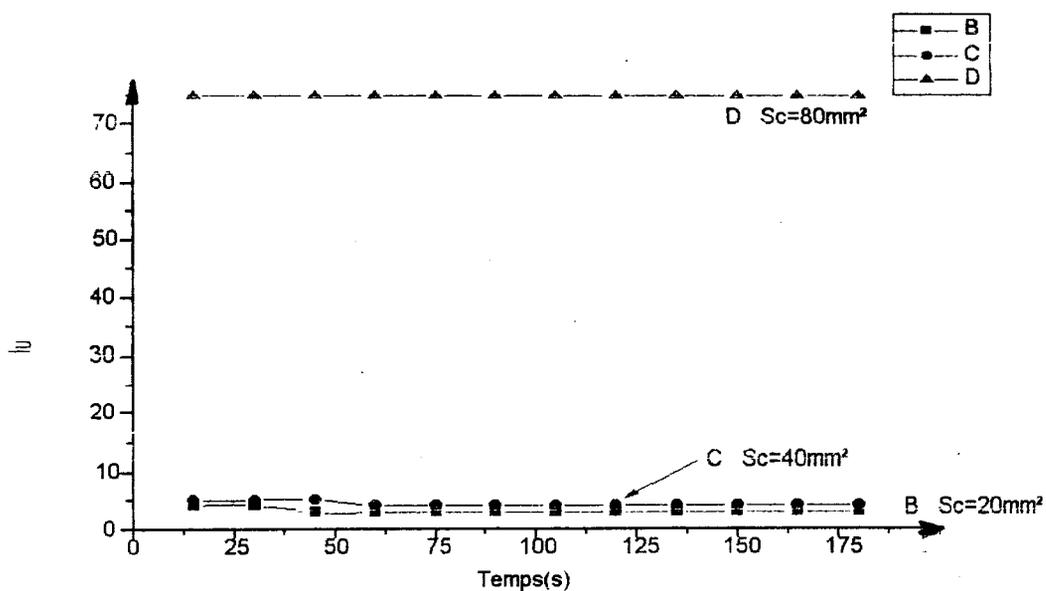


Fig.28. Evolution de l'usure en fonction du temps
Variable d'étude: Surface de contact.

Encore une fois, nous constatons que l'épaisseur de la couche usée reste pratiquement constante pour chaque valeur du paramètre étudié. La forte augmentation enregistrée pour la surface de contact de 80 mm² peut être expliquée par le fait d'une chaleur élevée modifiant ainsi le comportement du matériau en friction.

Conclusion

Les résultats sont dûs à l'homogénéité de la structure et à la dureté du matériau élaboré. La présence du manganèse de l'ordre de 0,94-0,97% dans ce matériau permet d'obtenir une assez grande dureté [HB = 200Kgf/mm²] et une structure perlitique avec une présence de 3-5% de ferrite améliorée et des traces de cémentite. Ce qui confère à ce produit une bonne tenue à l'usure du fait que les constituants durs supportent les pressions spécifiques et l'usure de la matrice douce (ferrite) crée des canaux qui retiennent le lubrifiant [24].

On remarque que pour la vitesse de 112 tr/mn ainsi que pour la charge de 20 Kgf, on relève une courte période (50s) avant la stabilisation du phénomène. La particularité relative à la charge s'explique par un effet dynamique important. Quant à celle provoquée par la vitesse relative, elle est liée à l'adaptation des surfaces en friction.

En général, cette étude montre que le matériau élaboré est d'une résistance à l'usure stable. Pour tous les essais effectués, nous remarquons que les couches usées demeurent constantes.

En effet, la connaissance de l'homogénéité de la structure et de l'évolution de son comportement à l'usure nous permet dans le cadre de la fonction maintenance, un entretien préventif.

IV.7. APPLICATION PRATIQUE DU TRAVAIL

L'utilisation d'un lit de fusion composé essentiellement de fonte hématite d'EL HADJAR en substitution de la fonte de moulage importée et coûteuse, permet d'améliorer la qualité du métal obtenu. En agissant sur la composition chimique du métal, on peut obtenir d'autres nuances de la fonte grise lamellaire telles que Ft20, Ft25 et Ft30.

Ce travail trouve son application dans l'industrie manufacturière pour la fabrication de plus de 60 % des pièces de machines destinées notamment à supporter des vibrations ou à résister à l'usure. On peut citer les pièces suivantes: disque de friction, pignon de friction, fourchette, roues dentées, douilles, paliers, bielles du MAT, leviers, chapeau des cardes, tambours des cardes, roue étoilée, porte cylindre du CAT, banc à broche etc...

D'autre part, il trouve son application dans le domaine hydraulique pour la fabrication des pièces devant supporter des pressions, telles que les corps des vannes qui sont caractérisées par une grande étanchéité (voir en annexe: le compte rendu de la direction du complexe pompes-vannes de BERROUAGHIA).

Aussi, ce matériau peut subir une trempe superficielle à cause de sa teneur en manganèse (0,94 à 0,97%), qui tend à favoriser la trempabilité martensitique; et lui permettant ainsi, un emploi pour la fabrication de nombreuses pièces qui exigent à la fois une faible usure et une certaine plasticité dans la masse.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, on a étudié la possibilité de remplacer la fonte de moulage importée par la fonte d'hématite d'EL HADJAR caractérisée en particulier par une teneur élevée en Mn de l'ordre de 2,5 à 3,0% pour l'obtention de la fonte grise lamellaire. Pour cela, une démanganésation préalable s'impose. Le lit de fusion composé de la fonte d'affinage d'EL HADJAR, FeSi75, Fe₂O₃, Carbone, P₂O₅(CaO)₄, CaCO₃ et SiO₂ ont servi à la préparation de la fonte grise lamellaire Ft15, dans le but d'obtenir un matériau ayant des propriétés mécaniques et technologiques satisfaisantes.

La technologie de fusion adoptée s'est avérée adéquate. Cependant, elle présente un inconvénient qui est la longue durée d'oxydation du Manganèse dans les fours rotatif et à arc électrique avec revêtement basique.

L'utilisation insuffisante de la fonte d'affinage en fonderie est expliquée par l'absence de recommandations sur la qualité des pièces moulées obtenues à sa base en tenant compte de ses propriétés héréditaires. C'est pourquoi l'étude de l'hérédité des fontes d'affinage sur les fontes de deuxième fusion est indispensable.

Les avantages que présente la fonte d'affinage d'EL HADJAR

- La faible teneur en Silicium
- La présence d'inclusions graphitiques de faibles dimensions malgré sa haute teneur en carbone.
- La teneur assez basse des micro-additions et gaz dissous.
- Le prix de revient relativement bas par rapport à l'élaboration de la fonte de moulage feront d'elle à l'avenir un composant essentiel des lits de fusion en fonderie. On a démontré qu'on peut augmenter son pourcentage dans la composition du lit de fusion des fontes grises.

Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus au complexe pompes-vannes de BERROUAGHIA, utilisant un lit de fusion composé de 10-15% de fonte d'affinage d'EL HADJAR, 30% de fonte de moulage importée, le reste étant composé de 60% de retour de production (systèmes d'alimentation, pièces rebutées, CaCO₃, FeSi75 et Carbone) .

Néanmoins, la teneur de Mn reste un peu élevée, elle est de l'ordre 0,94 à 0,97% (teneur admise selon la norme française NFA32101, elle varie de 0,1 à 1,0% dans les fontes grises non alliées). Les mesures de dureté effectuées sur nos échantillons au cours de la fusion ont montré qu'elle varie d'une façon linéaire. Ce qui est dû à la variation de la teneur en Mn qui accroît la stabilité de la Perlite et Cémentite en formant un carbure mixte Fe_3C-Mn_3C ou la présence de la Cémentite manganésifère de grande stabilité et formation de la Ferrite améliorée, confirmant ainsi nos recherches bibliographiques.

Les examens micrographiques des échantillons prélevés sur des éprouvettes standards coulées à la température 1392° ont montré une répartition plus ou moins régulière du graphite de type B (graphite en rosette) du centre vers l'extérieur.

En revanche, celles des échantillons prélevés sur d'autres éprouvettes coulées à la même température que les précédentes avec addition de trois (03)kg de FeSi75 dans la poche de coulée, montrent que la répartition du graphite de type B est plus régulière du centre vers l'extérieur ce qui est dû à l'action de l'inoculation.

La microstructure des échantillons de diamètre 5 et 10 mm est caractérisée par une répartition du graphite de type D (graphite inter dendritique) avec la présence de 5% de graphite dans la matrice et des traces de Cémentite. Ce phénomène est dû à la vitesse de refroidissement (au contact des parois du moule).

Par contre, celle des échantillons de diamètre 20, 30 et 40 mm est caractérisée par une répartition régulière du graphite de type B avec la présence de 10 à 15% de graphite dans la matrice et des traces de Cémentite.

La présence du Manganèse de l'ordre de 0,94 à 0,97% dans la fonte élaborée permet d'obtenir une assez grande dureté et une structure Perlitique avec la présence dans la matrice de 3 à 5% de Ferrite améliorée et des traces de Cémentite et de l'Eutectique phosphoreux. Ce qui confère à ce matériau une bonne tenue à l'usure du fait que les constituants durs, supportent les pressions spécifiques et l'usure de la matrice douce (Ferrite) crée des canaux qui retiennent le lubrifiant.

Perspectives d'avenir

Au vu des résultats obtenus, il serait intéressant:

- De poursuivre cette étude, par des essais avec la fonte d'affinage d'EL HADJAR en la mélangeant d'une part, avec le retour de production et d'autre part, avec la ferraille d'acier, ce qui permettra une diminution du temps d'oxydation du manganèse et une amélioration des caractéristiques mécaniques et technologiques du produit obtenu.

- D'avoir de la fonte d'affinage d'EL HADJAR ayant un taux de manganèse constant.

- D'insérer un dispositif de démanganésation dans la section de fusion qui influera de manière positive sur la production.

- De remplacer le revêtement basique du four à arc électrique par celui acide, indispensable pour diminuer l'action nocive du laitier sur le revêtement du four.

L'autre perspective du travail futur est d'étudier notamment la possibilité d'obtention de la fonte G.S. (à graphite sphéroïdal) à base de la fonte d'affinage d'EL HADJAR, substituant ainsi de nombreux matériaux métalliques dont notamment l'acier.

Nous souhaiterions que ces compléments techniques d'orientation seront pris en considération par l'entreprise au même titre que les résultats initiaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] - ALEKSENDROV N. M

Production métallurgique, qualité des gueuses de première fusion N°9 P.7 - 9 1980.

[2] - ALEKSENDROV N. M

Peredelni domenni tchougoun I proizvodstve tchougounnogo litia MOSCOU 1980.

[3] - J.BARRALIS, G.MAEDER

Précis de métallurgie élaboration structures, propriétés et normalisation P.7-9 PARIS 1983

[4] - BALONDIN G.F. OSNOVI

Théorie sur la formation des gueuses p.335 MOSCOU 1979

[5] - BOGATCHOV I.N.

Métallographie des fontes P.390 Sverdlousk MOSCOU 1962

[6] - BOITEL D., HAZARD C.

Guide de la maintenance p122-126, PARIS, 1981

[7] - BAZOVSKY I.

Théorie et pratique de la sureté de fonctionnement p.72-75, PARIS, 1978

[8] - BOUBLIK M.A

Production métallurgique. Les fissures dans les gueuses en fonte sulfureuse N°9 p.38-39 1963

[9] - BRETON H.

Manuel pratique de fonderie de fonte p.71-72 1966

[10] - CHAUSSIN C., HILLY G.

Métallurgie Alliages métalliques tome1 P.50-70, PARIS 1978

[11] - CHAUSSIN C., HILLY G.

Métallurgie Elaboration des métaux tome2 P.127, PARIS 1978

[12] - CHEVCHOUK S.A.

Liteynoe proizvodstvo p.35-36 N°8 1971

[13] - COLLAUD A., THIEME J.C.

Toughness of flake graphite cast-iron as and index of quality and new methods for improving.
The toughness foundry trade J. 122. N°2619 1967

[14] - COLOMBIER L.

La métallurgie du fer p.37-39 Dunod 1948

[15] - DECROP M.

Quelques expériences sur la germination du graphite dans les fontes. Journal de fonderie N°247
septembre 1966

[16] - DMITRIEV Y., DMITRIEV G

Travaux pratiques de technologie des métaux p.6-7 I.N.I.L. 1981

[17] - J.DURAND

Les fontes, épuration et enrichissement, conférence du centre d'études supérieurs de métallurgie
premier cycle p.79-91, 1941-1942

[18] - GEIER M.

Métallurgie de fonderie tome1 p.10-12; p.120-128 Paris 1976

[19] - GEIER M.

Métallurgie de fonderie tome2 p.41-87 Paris 1978

[20] - GUEROTSOV N.F.

Pièces moulées obtenues à partir des fontes de première fusion à base de teneur en Silicium
p.6-11 1971

[21] - GUIRTCHOVITCH A.A.

Manuel pratique sur les fontes de deuxième fusion LENINGRAD 1978

[22] - GUIRTCHOVITCH A.A.

Processus de fusion dans les cubilots modernes p.195-232 MOSCOU 1952

[23] - ILOUCHINE B.

Vlianie vagranotchnogo prreplava domennogo tchougouna na ego strouctourou I svoistva trouidi touluskodo politekhnika tchekogo institouta toula X p.108-115 1977

[24] - IVANOV V.

Fonderie de fonte Département de métallurgie p.8-21; p.30-68 Université de ANNABA

[25] - JOUKOV A.A.

Gueometriicheskaia thermodynamika splavov gelesa p.229 1979

[26] - JOURNAL LITEYNOE

Production N°9 p.37-38 1958; N°5 p.7-9 1964; N°6 p.7-9 1973; N°1 p.39 1971

[27] - JOURNAL LITEYNOE

Production N°9 p.21 1958; N°1 p.39-40 1974; N°9 p.5-7 1980; N°10 p.10-11 1976

[28] - JOURNAL LITEYNOE

Production N°4 p.7-10 1958; N°3 p.22-23 1969; N°4 p.6-11 1971; N°9 p.4-5 1958; N°4 p.25 1972; N°8 p.35-36 1971

[29] - KARPOV P.M.

Premenie nizkokremnistikh liteynikh tchougounov I vagranke liteynoe proisvodstvo N°5 p.3-5 1963

[30] - KLETSKIN G.I.

Fonderie de fonte et machine de construction P.320 MOSCOU 1975

[31] - KLESKIM G.I. RABINOVITCH V.D

Production métallurgique. utilisation des fontes de première fusion N°7 p.7-8 1979

[32] - KOLESNIKOV A.G.

Production de la fonte. Remplacement de la fonte de moulage par les fontes d'affinage N° 9 p.43-44 1971

[33] - LAKHTINE I.

Métallographie et traitement thermique des métaux édition MIR MOSCOU 1978

[34] - LAMY B.

Thèse d'état mécanique des surfaces MULHOUSE, 1981

[35] - LAPLANCHE H.

Les fontes et leurs traitements thermiques Métallurgie structurale tome1 p.18-20; p.77-78 pyc édition DESFORGES 1976

[36] - LAPLANCHE H.

Etude non publiée sur la composition et la structure des minerais oolithiques de Lorraine, pont à Mousson (1924-1927).

[37] - LEFEVRE R.

Graissage et tribotechnique p 43-55 PARIS, 1975

[38] - LEVIL I

Production de la fonte. Coulabilité des fontes N°11 p.23-25 1973

[39] - LEVIL I.

Structure et caractéristiques mécaniques des fontes de première fusion de différentes usines métallurgiques N°4 p.25-26 1967

[40] - LEVIL I.

Caractéristiques des pièces coulées à base des fontes d'affinage N°4 p.25 1972

[41] - MICHKOV F.P.

Opit primeneniya peredelnykh tchougounov i vagranotchnom process liteynoe proizvodstvo N° 5 p5-7 1950

[42] - OLINGER M.

Les origines du Soufre dans le fonte N° 11 p.393 Janvier-fevrier-mars 1934

[43] - PATTERSON W. DOPP R.

Einheitliche bewertung von gugoussen. Mit lamellengraphit giesserei 60 N°2 p.32-39 1973

[44] - PETRICHENKO B.U.

Liteynoe proizvodstvo N° 9 p.2-3 1980

[45] - PIVOVARSKI E.

Viskokatchesteveneni tchougoun MOSCOU metallourguia 1965

[46] - PLATONOV B.P.

Remplacement des fontes de moulage par les fontes d'affinage en fonderie N°9 p.3-4 1980

[47] - POULOUKHINE B. GRINBERG

Technologie des métaux p.26-31 édition MIR MOSCOU 1967

[48] - POPELINSKI K.N.

Application des fontes obtenues dans les cubilots à partir des gueuses à basse teneur en Silicium p.23 MOSCOU 1971

[49] - A.ROST

Métaux usuels métallurgie, caractéristiques emploi P.50-53

[50] - N.SITOUAH, R.GVETADZE

Utilisation de la fonte d'affinage d'EL HADJAR en substitution de la fonte de moulage importée pour l'élaboration des pièces en fontes grises. Revue scientifique P.36-38, I.N.I.L 1987

[51] - N.SITOUAH, R.GOUSSEINOV, GV.NOJAK

Contribution à l'étude de la variation de la dureté de la fonte Ft15 (obtenue à base de la fonte d'affinage d'EL HADJAR) en fonction de la teneur en Mn. Revue scientifique P.14, I.N.I.L. 1988

[52] - TCHERNOGOROV U.P.

Structure et caractéristiques mécaniques des fontes synthétiques N°9 p.26 1972

[53] - VERTMAN A.A., CAMARIN A.M.

Svoistva rasplavov gelesa p.280 MOSCOU naouka 1969

[54] - VORONOVA I

Katchestvo domennogo liteynogo tchougouna I pout ego povchenia oukrninti 1975

[55] - VUCHNIAKOV I

Technologie et organisation de la production N°3 p.9-12 KIEV 1978

Liste des figures

- Fig.1. Schéma du haut fourneau
- Fig.2. Schématisation de la cristallisation d'un métal
- Fig.3. Diagramme Fe-C
- Fig.4. Diagramme structural de MAURER
- Fig.5. Diagramme structural de GREINER et KLINGSTEIN
- Fig.6. Diagramme structural de LAPLANCHE
- Fig.7. Four rotatif
- Fig.8. Four à arc électrique
- Fig.9. Canne pyrométrique
- Fig.10. Appareil mural de température type DTK01-A
- Fig.11. Variation des teneurs en Mn et Si dans la fonte d'affinage d'EL HADJ
- Fig.12. Eprouvette visuelle
- Fig.13. Eprouvette de contrôle de la composition chimique
- Fig.14. Oxydation du manganèse dans le four rotatif
- Fig.15. Oxydation du manganèse dans le four à arc électrique
- Fig.16. Dispositif de démanganésation par CCL_4
- Fig.17. Dispositif de la détermination du Carbone et du Soufre
- Fig.18. Complément du dispositif de détermination du soufre
- Fig.19. Eprouvette de traction
- Fig.20. Variation de la dureté Rockwall en fonction de la teneur en Mn
- Fig.21. Variation de la dureté Brinell en fonction de la teneur en Mn
- Fig.22. Corrélations entre les duretés Brinell et Rockwell
- Fig.23. Jets de différents diamètres

- Fig.24. Courbe d'usure
- Fig.25. Schéma synoptique du banc d'essai à l'usure
- Fig.26. Evolution de l'usure en fonction du temps (variable d'étude: Vitesse relative)
- Fig.27. Evolution de l'usure en fonction du temps (variable d'étude: Charge appliquée)
- Fig.28. Evolution de l'usure en fonction du temps (variable d'étude: Surface de contact)
- Photo.1. Echantillon de diamètre 32 mm Photo prise au centre x500
- Photo.2. Echantillon de diamètre 32 mm Photo prise à l'extrémité x500
- Photo.3. Echantillon de diamètre 32 mm sans attaque chimique
Photo prise au centre x500
- Photo.4. Echantillon de diamètre 32 mm après inoculation
Photo prise au centre x500
- Photo.5. Echantillon de diamètre 32 mm après inoculation
Photo prise à l'extrémité x500
- Photo.6. Echantillon de diamètre 32 mm après inoculation sans attaque chimique
Photo prise au centre x500
- Photo.7. Echantillon de diamètre 5 mm Photo prise au centre x500
- Photo.8. Echantillon de diamètre 10 mm Photo prise au centre x500
- Photo.9. Echantillon de diamètre 10 mm photo prise à l'extrémité x500
- Photo.10. Echantillon de diamètre 20 mm Photo prise au centre x500
- Photo.11. Echantillon de diamètre 20 mm photo prise à l'extrémité x500
- Photo.12. Echantillon de diamètre 30 mm Photo prise au centre x500
- Photo.13. Echantillon de diamètre 30 mm photo prise à l'extrémité x500
- Photo.14. Echantillon de diamètre 40 mm Photo prise au centre x500
- Photo.15. Echantillon de diamètre 40 mm Photo prise à l'extrémité x500
- Photo.16. Echantillon de diamètre 5 mm sans attaque chimique
Photo prise au centre x500
- Photo.17. Echantillon de diamètre 10 mm sans attaque chimique
Photo prise au centre x500
- Photo.18. Echantillon de diamètre 10 mm photo prise à l'extrémité x500

- Photo.19. Echantillon de diamètre 20 mm sans attaque chimique
Photo prise au centre x500
- Photo.20. Echantillon de diamètre 20 mm sans attaque chimique
Photo prise à l'extrémité x500
- Photo.21. Echantillon de diamètre 30 mm sans attaque chimique
Photo prise au centre x500
- Photo.22. Echantillon de diamètre 30 mm sans attaque chimique
Photo prise à l'extrémité x500
- Photo.23. Echantillon de diamètre 40 mm sans attaque chimique
Photo prise au centre x500
- Photo.24. Echantillon de diamètre 40 mm sans attaque chimique
Photo prise à l'extrémité x500
- Tableau.1. Classification des fontes d'affinage utilisées en fonderie
- Tableau.2. Classification des fontes de moulage
- Tableau.3. Classification des éléments graphitisants et antigrafitisants
- Tableau.4. Variation de la composition chimique du métal pendant la fusion
- Tableau.5. Variation de la teneur en Mn et Si dans la fonte d'affinage d'EL HADJAR
- Tableau.6. Composition chimique de la fonte élaborée
- Tableau.7. Valeurs expérimentales de σ_t et HB
- Tableau.8. Variations de duretés Brinell et Rockwell en fonction de la teneur en mn
au cours de l'élaboration du matériau
- Tableau.9. Conditions expérimentales
- Tableau.10. Variable d'étude: vitesse relative
- Tableau.11. Variable d'étude: charge appliquée
- Tableau.12. Variable d'étude: surface de contact

ANNEXES

Listing des annexes

1. Lettre de la direction du complexe pompes-vannes de BERROUAGHIA
2. Rapport d'analyse du matériau élaboré
3. Lettre de la direction générale du complexe d'EL HADJAR, laquelle faisant mention de l'utilisation de la fonte d'affinage d'EL HADJAR en substitution de la fonte importée.
4. Rapport d'utilisation de la fonte SOREL AS importée en vue d'augmenter le taux d'intégration de la fonte d'affinage d'EL HADJAR dans les fonderies.
5. Protocole d'essai de la première expérimentation
6. Longueur du graphite dans les fontes grises lamellaires selon la norme Allemande TGL 15477/03
7. Répartition du graphite dans les fontes grises lamellaires selon la norme Allemande TGL 15477/03
8. Pourcentage de graphite dans la matrice selon la norme Allemande TGL 15477/03.
9. Type de graphite lamellaire des fontes grises
10. Norme Française NFA 32-101
11. Essai métallographique
12. Structure des échantillons de différents diamètres