

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Mémoire de Fin d'Etudes

pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie

*Détermination de la bande triphasée
par la méthode de traitements
thermiques pour les fontes GSC, GSA
et la Ft25.*

Encadré par :

Pr. E.SALHI

Réalisé par :

Mr. Mohamed-El Meki BOURAS

Promotion juin 2010

ENP: 10 Avenue Hassen Badi 16200 EL-Harrach, Alger

Albert Einstein (1879-1955)

« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.

La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. »

Résumé :

Le but de ce travail est la détermination de la bande triphasée (BT) par la méthode du traitement thermique afin d'exploiter ce domaine inconnue par les industriels. Ce traitement thermique a permis également de délimiter le domaine austénitique où la température de chauffage sera optimisée. Les propriétés mécaniques et structurales ont fait l'objet également de notre étude.

Les mots clés : fontes, graphite lamellaire, graphite sphéroïdal, traitements thermiques, bande triphasée, trempe, revenu.



Abstract :

The aim of this work is the determination of the band-phase by the method of treatment in order to exploit this area by unknown manufacturers. This heat treatment has also delineated the area where the austenitic temperature of heating will be optimized. The mechanical and structural properties have been also in our study.

Key words: cast iron, lamellar graphite, spheroid graphite, heat treatment, three-phase band, the hardening, tempering.



ملخص :

الهدف من هذا العمل هو تحديد المجال ثلاثي الأطوار باستعمال تقنية المعالجة الحرارية من أجل استغلال هذا المجال غير معروف من قبل الشركات المصنعة. هذه المعالجة الحرارية تحدد أيضا المجال الأوستنيتي التي ستكون درجة الحرارة فيه الأمثل للتسخين. تشمل كذلك دراستنا الخصائص الميكانيكية والهيكلية.

كلمات المفتاحية: حديد الزهر ، الجرافيت الرفائقي ، الجرافيت الكروي ، المعالجة الحرارية ، المجال ثلاثي الأطوار، تصلب ، هدأ.

DEDICACES

Ce modeste travail n'est que le fruit d'un acharnement et d'une volonté qui s'agrandissaient de plus en plus. Ce but tant espéré n'a pu se réaliser sans la présence de tous ceux qui m'ont aidé, soutenu et encouragé dans les moments les plus difficiles ; pour cela je dédie ce mémoire :

- ❖ *À mon cher grand père et ma chère grande mère, que Dieu les protège.*
- ❖ *À mon cher père et ma chère mère, qui m'ont apporté de l'aide et m'ont toujours poussé vers l'avant, que Dieu les protège.*
- ❖ *À mon cher frère **Djamal**.*
- ❖ *À mes chères sœurs **Amina, Wafa et Rania**.*
- ❖ *À tous mes oncles et mes tantes.*
- ❖ *À mon promoteur le Pr **E. Salhi** qui m'a beaucoup aidé.*
- ❖ *À tous ceux qui m'ont aidé durant mon parcours,*
- ❖ *À tout mes amis.*
- ❖ *À toutes les familles **BOURAS et DRIOUCHE**.*

Mohamed el Meki BOURAS

REMERCIEMENT

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à faire ce modeste travail.

Aucun travail n'est possible dans l'isolement. Les rencontres, les conseils et les encouragements constituent des aides précieuses souvent décisives. C'est pourquoi je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué à ce travail parfois sans le savoir ou du moins sans mesurer la portée de leur influence.

Je souhaite témoigner toute ma gratitude au Professeur Essaïd SALHI, de m'avoir accueilli parmi ses élèves, et d'avoir ainsi bien voulu partager avec moi sa passion pour la recherche. La rigueur du raisonnement, le refus de toute idée préconçue, la remise en question perpétuelle même de ce qui semble établi, demeure à mes yeux les points forts de son enseignement et de ses orientations de recherche. Je lui dois les fruits de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur A.DELLALI d'avoir accepté de présider mon jury. Je suis tout particulièrement honoré et je l'en remercie sincèrement.

Mes plus vifs remerciements vont également à Monsieur Essaïd ISSOLAH, expert au département fusion de l'Unité de Fonderie de Rouiba pour l'aide et l'intérêt qu'il a toujours porté à mon travail.

Nous tenons à remercier les responsables de l'UFR de nous avoir aidé lors de notre passage pour un stage pratique effectué auprès d'eux.

Le jour d'une soutenance oral d'un PFE, l'étudiant soutient bien entendu le fruit d'un travail personnel. Toutefois, ce travail n'aurait pas pu exister dans sa forme finale sans l'aide précieuse d'autres personnes que je voudrais remercier tout particulièrement: Madame N.KECHOUE, Monsieur K.ABADLI, Monsieur M.E.DJEGHLAL, Monsieur A.DAIMELLAH, Monsieur A.KASSER et Monsieur N.MESRATI qui ont toujours critiqués mes idées avec beaucoup de bienveillance.

Enfin, merci à mes collègues que j'ai pu côtoyer à L'ENP et à la cité BOURAOUI AMAR avec une pensée particulière pour Amine et Sofiane. Je remercie très sincèrement mes parents et mes amis qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ces années. Enfin, je tiens à exprimer toute mon affection à Mohamed HAMROUCH pour son soutien et son aide.

Index des tableaux

N°	Titre des tableaux	Page
1	Domaines de composition des fontes	16
2	Propriétés mécaniques des fontes	17
3	Opérations de traitements thermiques des fontes moulées	28
4	Les températures des traitements thermiques utilisées	35
5	Caractéristiques mécaniques de la traction	43
6	Les fourchettes de la composition chimique de l'UFR	46
7	Composition chimique des fontes étudiées	46
8	caractéristiques mécaniques à l'état brut de coulée	50
9	les valeurs de la dureté de la fonte Ft25	50
10	les valeurs de la dureté de la fonte GSC	51
11	les valeurs de la dureté de la fonte GSA	52
12	Récapitulatif des intervalles de la bande triphasée	53
13	Les valeurs du taux de graphite	63
14	Les caractéristiques mécaniques après chauffage pendant deux heures suivi d'une trempe dans l'huile puis d'un revenu.	65

Index des figures

N°	Titre des figures	Page
1	Diagramme Fer-Cémentite	5
2	Diagramme d'équilibre Fe-C-Si à 2% de silicium	6
3	Zones de ségrégation des éléments d'alliage	7
4	Profil de répartition des éléments (C, Si, Mn, Cu et Ni) entre deux nodules de graphite à l'état brut de coulée	7
5	Transformation des fontes blanches	9
6	Fonte blanche hypoeutectique	10
7	Fonte blanche hypereutectique	10
8	Transformation des fontes grises	12
9	Le graphite sphéroïdal	18
10	Le graphite lamellaire	19
11	Les différents types de forme de graphite	19
12	Microstructure typique d'une fonte à graphite lamellaire attaquée au Picral à 4%	21
13	Microstructure typique d'une fonte à graphite sphéroïdal attaquée au Picral à 4%	22
14	Schéma d'un cycle de traitement thermique par trempe étagée typique	23
15	Microstructure d'une fonte traitée par trempe étagée à 325°C avec une matrice de bainite inférieur. Attaquée au Nital 2%	24
16	Microstructure d'une fonte traitée par trempe étagée à 375°C avec une matrice de bainite supérieur. Attaquée au Nital 2%	24
17	Microstructure d'une fonte traitée par trempe étagée à 350°C avec une structure mixte de bainite. Attaquée au Nital 2%	25
18	Fonte malléable à graphite nodulaire	26
19	Schémas des cycles de traitements thermiques de perlitisation (a) et de ferritisation (b)	29
20	Traitement thermique de trempe martensitique suivie d'un revenu	30
21	Influence de la température du revenu, après trempe à l'huile, sur la dureté.	30
22	Les keel-blacks avant la coulée (a) et après la coulée (b).	32
23	L'appareil de la spectrométrie en infra rouge.	33

N°	Titre des figures	Page
24	L'appareil de la spectrométrie de fluorescence aux rayons X.	34
25	Traitement thermique de la trempe dans l'eau.	34
26	Traitement thermique de la trempe dans l'huile suivi d'un revenu.	35
27	Schéma de principe du microscope sur l'aspect optique.	37
28	Microscope optique « OLYMPUS » du Département Métallurgie.	38
29	Représentation schématique de l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface d'un échantillon.	39
30	Représentation schématique d'un microscope électronique à balayage.	40
31	Essai de dureté Brinell HB.	41
32	La machine de dureté HB.	41
33	Les éprouvettes de traction pour les fontes GL (a), et les fontes GS (b).	42
34	Courbe conventionnelle de traction.	42
35	Courbe rationnelle de traction.	43
36	La méthode de grillage d'analyse quantitative des structures métallographiques.	44
37	La fonte Ft25 à l'état brut sans attaque chimique.	47
38	La fonte Ft25 à l'état brut avec l'attaque chimique.	47
39	La fonte GSC à l'état brut sans attaque chimique.	48
40	La fonte GSC à l'état brut avec l'attaque chimique.	48
41	La fonte GSA à l'état brut sans attaque chimique.	49
42	La fonte GSA à l'état brut avec l'attaque chimique.	49
43	la variation de la dureté en fonction de la température de la fonte Ft25.	51
44	L'évolution de la dureté en fonction de la température de la fonte GSC.	52
45	la variation de la dureté en fonction de la température de la fonte GSA.	53
46	La fonte Ft25 à la température 700°C × 200.	54
47	La fonte Ft25 à la température 700°C × 500.	54
48	La fonte Ft25 à la température 780°C × 200.	55
49	La fonte Ft25 à la température 780°C × 500.	55
50	La fonte Ft25 à la température 800°C × 200.	56

N°	Titre des figures	Page
51	La fonte Ft25 à la température 800°C × 500.	56
52	La fonte GSC à la température 700°C × 200.	57
53	La fonte GSC à la température 700°C × 500.	57
54	La fonte GSC à la température 840°C × 200.	58
55	La fonte GSC à la température 840°C × 500.	58
56	La fonte GSC à la température 880°C × 200.	59
57	La fonte GSC à la température 880°C × 500.	59
58	La fonte GSA à la température 700°C × 200.	60
59	La fonte GSA à la température 700°C × 500.	60
60	La fonte GSA à la température 840°C × 200.	61
61	La fonte GSA à la température 840°C × 500.	61
62	La fonte GSA à la température 860°C × 200.	62
63	La fonte GSA à la température 880°C × 200.	62
64	La fonte GSA à la température 880°C × 500.	63
65	Le taux de graphite en fonction de la température.	64
66	La fonte Ft25 après trempe dans l'huile à 800°C suivie d'un revenu.	66
67	La fonte GSC après trempe dans l'huile à 865°C suivie d'un revenu.	67
68	La fonte GSA après trempe dans l'huile à 865°C suivie d'un revenu.	68
69	La fonte Ft25 après trempe dans l'huile à 850°C suivie d'un revenu.	69
70	La fonte GSC après trempe dans l'huile à 910°C suivie d'un revenu.	70
71	La fonte GSA après trempe dans l'huile à 910°C suivie d'un revenu.	71

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1. DEFINITION	4
2. DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE	5
2.1. Diagramme d'équilibre fer-cémentite.....	5
2.2. Diagramme d'équilibre Fer-Graphite.....	6
3. ELABORATION DES FONTES	8
3.1. Fontes de première fusion.....	8
3.2. Fontes de seconde fusion.....	8
4. STRUCTURE DES FONTES	8
4.1. Fontes blanches	8
4.2. Fontes grises	11
5. INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION	14
6. PROPRIÉTÉS DES FONTES	16
6.1. Types de graphite.....	17
6.2. Fontes grises à graphite lamellaire.....	20
6.3. Fontes grises à graphite sphéroïdal.....	21
7. LES FONTES G.S BAINITIQUES	23
7.1. La production des fontes G.S bainitiques.....	23
7.2. Les propriétés des fontes G.S bainitiques.....	24
8. LES FONTES MALLEABLES	25
8.1. Les propriétés des fontes malléables.....	26
8.2. Les domaines d'applications.....	27
9. TRAITEMENTS THERMIQUES DES FONTES	27
9.1. Traitements thermiques de graphitisation.....	29
9.2. Traitements thermiques de type martensitique.....	29
CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES	31
1. MATERIAUX UTILISÉS	32
2. COMPOSITION CHIMIQUE	32
2.1. La spectrométrie en infra rouge.....	33
2.2. La spectrométrie de fluorescence aux rayons X.....	33
3. LES TRAITEMENTS THERMIQUES EFFECTUÉS	34
3.1. Traitement thermique des échantillons.....	34
3.2. Traitement thermique des éprouvettes.....	34
4. CARACTERISATION	35
4.1. Caractérisation microstructurale.....	35
4.1.1. Préparation des échantillons.....	35

4.1.2. Attaque chimique.....	36
4.1.3. Observation microscopique.....	36
4.2. Caractérisation mécanique.....	40
4.2.1. Essai de dureté.....	40
4.2.2. Essai de traction.....	41
5. ANALYSE QUANTITATIVE.....	44
CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	45
1. DESCRIPTION DES FONTES A L'ÉTAT BRUT DE COULÉE.....	46
1.1. La composition chimique.....	46
1.2. La microstructure.....	47
1.3. Caractéristiques mécaniques.....	50
2. DÉTERMINATION DE LA BANDE TRIPHASÉE PAR LA	
MÉTHODE DE TRAITEMENT THERMIQUE.....	50
2.1. Trempe à l'eau aux différentes températures.....	50
2.2. Étude métallographique.....	54
2.3. La variation du taux de graphite.....	63
3. ÉTUDES STRUCTURALES ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES.....	65
3.1. A partir d'un traitement thermique dont le	
chauffage dans la bande triphasée.....	66
3.2. A partir d'un traitement thermique dont le	
chauffage supérieur à la température $A1_{max}$	69
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	73
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	74

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Comparées aux autres matériaux métalliques, les fontes offrent aux utilisateurs un large choix de caractéristiques mécaniques pour un prix intéressant, compte tenu des matières premières employées et de la facilité d'élaboration. Leur domaine d'emploi est sensiblement élargi grâce à des traitements thermiques appropriés qui permettent de varier les propriétés mécaniques et structurales.

*Les fontes à graphite sphéroïdale (**GS**) sont caractérisées par la présence de graphite sphéroïdal réparti dans une matrice métallique de composition de type Fe-C-Si présentant une hétérogénéité chimique entre les sphéroïdes. Ces fontes possèdent des propriétés mécaniques qui peuvent être remarquables, et ont donné lieu depuis les années 1970 à une utilisation croissante.*

Ces fontes représentent donc un matériau de plus en plus en concurrence face aux aciers. La diversité des conditions de sollicitation des pièces telles que les roues dentées, pignons, vilebrequins, leviers divers etc... a imposé l'utilisation des fontes à graphite sphéroïdal.

*L'objectif principal de notre travail est de déterminer et caractériser l'intervalle de la bande triphasée (**BT**) pour les fontes à graphite sphéroïdale **GSC** et **GSA** ; et la fonte à graphite lamellaire, la **Ft25**. Le domaine de la **BT** n'est pas utilisé à l'échelle industrielle, ce qui nous a orientés à déterminer ce domaine de température. Les fontes ont été élaborées à l'Unité de Fonderie de Rouiba (**UFR**). Pour cela, l'étude a été répartie en trois chapitres :*

Le premier retrace une étude bibliographique concernant les différents types, les propriétés et les traitements thermiques des fontes ordinaires.

Dans le deuxième nous présentons une description détaillée des techniques expérimentales utilisées telles que la spectrométrie, la dureté, la microscopie optique et l'essai de traction.

Le dernier chapitre est réservé à la présentation des différents résultats obtenus sous forme de courbes, de tableaux et de métallographies, suivi par des discussions et des interprétations.

Ce travail sera clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE-I : **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

Les alliages de fonderie constituent un ensemble de matériaux métallique, permettant la réalisation des pièces finies ou semi-finies par moulage.

Parmi les alliages de fonderie, les fontes ont une grande importance ; elles forment une famille de matériaux ferreux qui être classée de façon logique.

Les fontes comprennent un grand nombre d'alliages de fer-carbone dont les microstructures et les propriétés sont très variées. Ce sont des matériaux très économiques, qu'on obtient uniquement par fonderie, puisque leur mise en forme par déformation plastique, à quelque température que ce soit, est impossible.

Les propriétés des fontes qui contiennent du graphite sont fonction de la nature de leur matrice, qui peuvent être ferritique ou perlitique, selon le mode de refroidissement. Comme les aciers, les fontes se prêtent bien aux traitements thermiques, ce qui permet d'obtenir également des matrices, martensitiques ou bainitiques.

1. DEFINITION

Une fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Il est à noter que la présence de fortes teneurs en éléments carburigènes peut modifier cette limite de la teneur en carbone. Dans la pratique les pourcentages de carbone se situent le plus souvent entre 3 et 4%.

Composition moyenne :

- Carbone : 3 à 4%
- Silicium : 0,5 à 2,5%
- Manganèse : 0,4 à 1%
- Phosphore : $\leq 2\%$
- Soufre : $\leq 0,12\%$

Dans une fonte, le carbone prend la forme de cémentite ou de graphite, ou simultanément sous ses deux formes (fonte truitée). La cémentite donne lieu à une cassure de couleur claire spécifique. C'est pourquoi une fonte dont tout le carbone est sous forme de cémentite est dite blanche. Le graphite rendant la cassure grise, d'où la fonte elle-même est appelée fonte grise [1].

Selon la teneur en carbone, on détermine les différents types de fontes suivants:

- **fonte hypoeutectique** : de 2,11 à 4,3 % de carbone ;
- **fonte eutectique** : 4,3 % de carbone

Cette fonte a la température de fusion la plus basse à 1135 °C.

- **fonte hypereutectique** : de 4,3 à 6,67 % de carbone ;

Les aciers cristallisent dans le diagramme fer-carbone métastable: fer-cémentite, alors que les fontes grises cristallisent dans le diagramme fer-carbone stable ou fer-graphite. La différence entre ces deux diagrammes réside simultanément dans la vitesse de refroidissement lente, permettant d'obtenir du graphite au lieu de la cémentite [1].

2. DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE

Les diagrammes d'équilibre sont construits à partir des conditions d'équilibre, ou des conditions assez proches de celle-ci ; ils nous indiquent la composition des phases et la structure de l'alliage en fonction de la température et la concentration. La connaissance du diagramme d'équilibre nous permet de prévoir que certaines transformations ne pouvant jamais se faire pour une température et une composition donnée, sans pour autant permettre de savoir si une transformation possible se produise avec une vitesse appréciable.

Il existe deux types de diagrammes d'équilibre Fer-Carbone, le diagramme Fer-cémentite (**Figure-1**) dit métastable, et le diagramme Fer-graphite (**Figure-2**) dit stable [2].

2.1. Diagramme d'équilibre fer-cémentite

La **figure I-1** présente le diagramme d'équilibre Fer-Cémentite qui traduit la composition des phases et la structure des alliages Fer-Carbone, dont la concentration varie de fer pur à la cémentite (6,67% de C). Le point A(1534°C) du diagramme correspond au point de fusion du fer pur, alors que le point D(1230°C) à celui de la cémentite. Quand au point N(1400°C) et G(910°C), il marque la transformation polymorphe du fer.

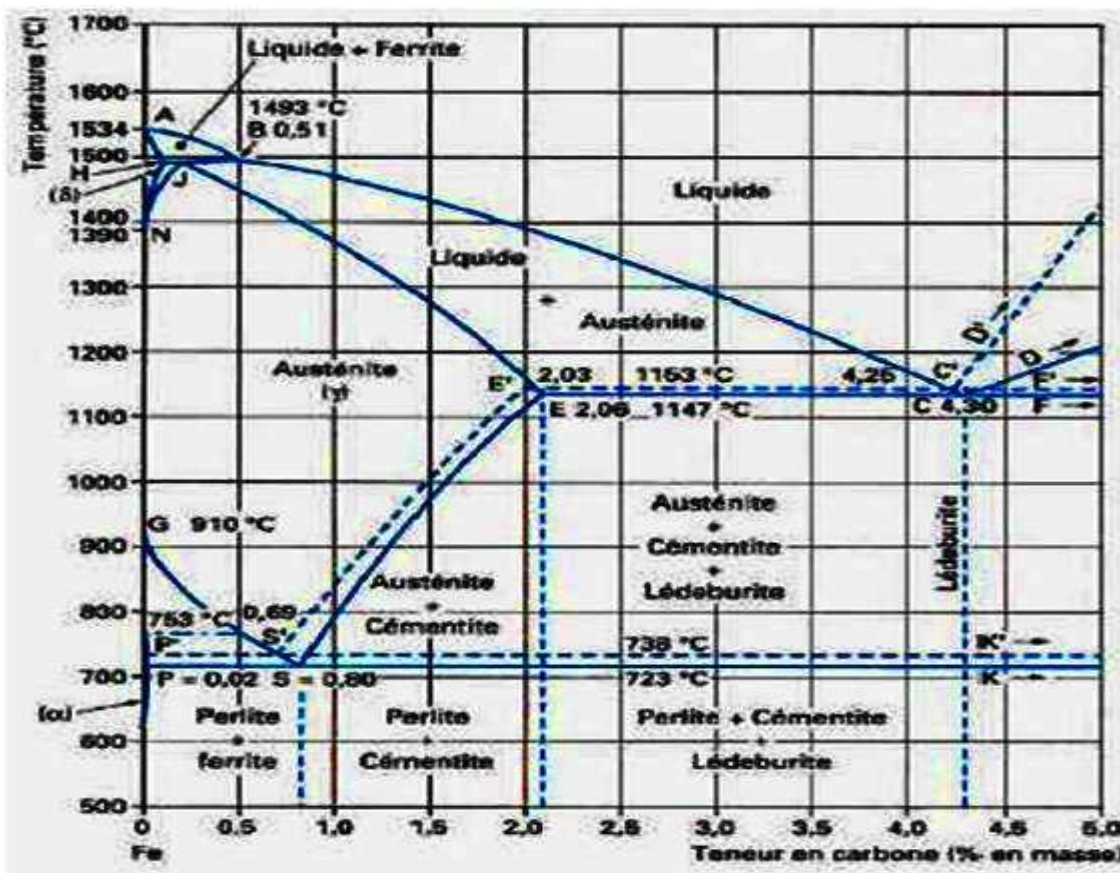


Figure-1: Diagramme Fer-Cémentite [2].

2.2. Diagramme d'équilibre Fer-Graphite

La formation d'une phase stable de graphite dans la fonte peut se produire soit par précipitation immédiate du graphite à partir de la solution liquide (ou solide), soit par la décomposition de la cémentite déjà formée [2].

• La bande triphasée

L'intervalle de température de la bande triphasée dépend de plusieurs paramètres. Les températures limites inférieures et supérieures de ce domaine fluctuent avec la variation de la composition chimique de la matrice. Une fonte de composition donnée peut présenter plusieurs types de matrice en fonction de la loi de refroidissement appliquée à l'issue d'une phase d'austénitisation.

La détermination de la bande triphasée sera fonction de la compétitivité entre la cinétique de chauffe et la cinétique de transformation des phases initialement présentes.

La température A_1 de la zone I (**Figure-3**) est plus élevée que la température A_1 de la zone III et il devient évident que cette évolution engendre la création d'un intervalle de température [A_{1min} - A_{1max}] fluctuant entre ces deux extrêmes. Si on se place dans cet intervalle de températures, après maintien assez long, on sera toujours en présence de 3 phase $\alpha + \gamma +$ graphite, d'où le nom de "bande triphasée", où γ , a tendance à se transformer en $\alpha+G$ (voir la **Figure-2**).

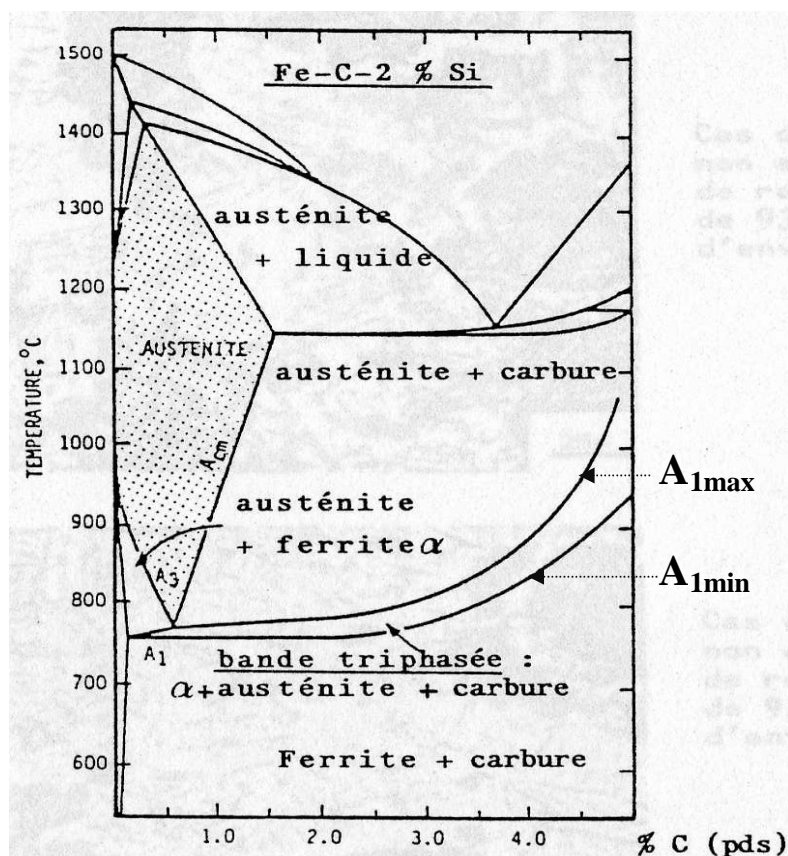


Figure-2: Diagramme d'équilibre Fe-C-Si à 2% de silicium [3].

• Ségrégation des éléments d'alliage

Durant le processus de solidification certains éléments chimiques peuvent subir des ségrégations, notamment, les deux principaux éléments d'alliage, le carbone et le silicium. Il est ainsi possible de délimiter la matrice des fontes G.S en 3 zones de composition chimique différente (**Figure-3**) [4].

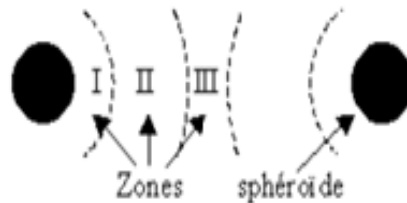


Figure-3: Zones de ségrégation des éléments d'alliage [4].

La zone I est définie comme étant la plus proche des sphéroïdes de graphite. La zone III est située au niveau des joints de cellules eutectiques et la zone II est intermédiaire aux deux précédentes.

On observe clairement (**Figure-4**) que les éléments Si, Cu et Ni sont en surconcentration dans la zone I par rapport aux zones II et III. Par contre le manganèse est en surconcentration dans la zone III. Le fait que le taux de carbone soit plus élevé dans cette zone est évident puisque cette zone contient de la perlite [5].

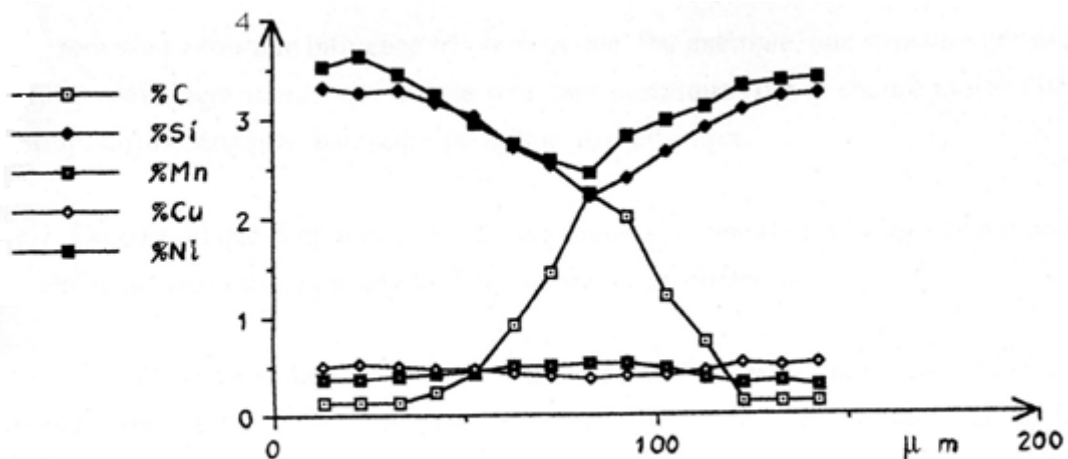


Figure-4: Profil de répartition des éléments (C, Si, Mn, Cu et Ni) entre deux nodules de graphite à l'état brut de coulée [5].

3. ELABORATION DES FONTES

3.1. Fontes de première fusion

C'est la fonte de base qui est obtenue directement par le traitement du minerai. Le déroulement des opérations est le suivant :

- Extraction du minerai ;
- Concassage, broyage ;
- Enrichissement pour éliminer le plus possible de gangue ;
- Agglomération pour en faire des blocs ;
- Réduction de ce minerai dans un haut fourneau pour obtenir de la fonte de première fusion sous forme de gueuses dont une partie sera affinée pour obtenir l'acier [6].

3.2. Fontes de seconde fusion

Les fontes de seconde fusion, sont obtenues par refusions des gueuses de premières fusion, affinage et dosage en fonction de la nuance voulue. Il faut remarquer qu'on rajoute également à ces gueuses des retours de fonderie et la ferraille [6].

La seconde fusion est pratiquée :

- dans un four à creuset, pour de faibles quantités de fonte ;
- au four à réverbère, on peut alors obtenir plus de 10 t de fonte en une seule opération ; mais, pendant la fusion il y a oxydation notable du silicium ;
- au cubilot [7].

4. STRUCTURE DES FONTES

La structure de solidification présente les phases et constituants prévus par les diagrammes d'équilibres lorsque les compositions sont franchement hypo ou hypereutectiques, ces dernières n'ayant d'ailleurs que de rares applications ; dans le cas $C_{\text{éq}}$ est compris entre 4,2 et 4,5%, ce qui correspond à l'optimum des propriétés de fonderie dont la structure est susceptible de contenir tout à la fois des dendrites d'austénite transformée à la température supérieure à $A_{1\text{max}}$ et des particules primaires (graphite ou cémentite) en plus des "cellules eutectiques" formant la partie prépondérante de l'agrégat [7].

4.1. Fontes Blanches

Leurs transformation sont décrites exclusivement par le diagramme métastable du fait que la seule phase riche en carbone sa forme est Fe_3C .

Selon la teneur en carbone, on distinguera les fontes à cémentite hypoeutectiques, eutectique et hypereutectique (**Figure-5**).

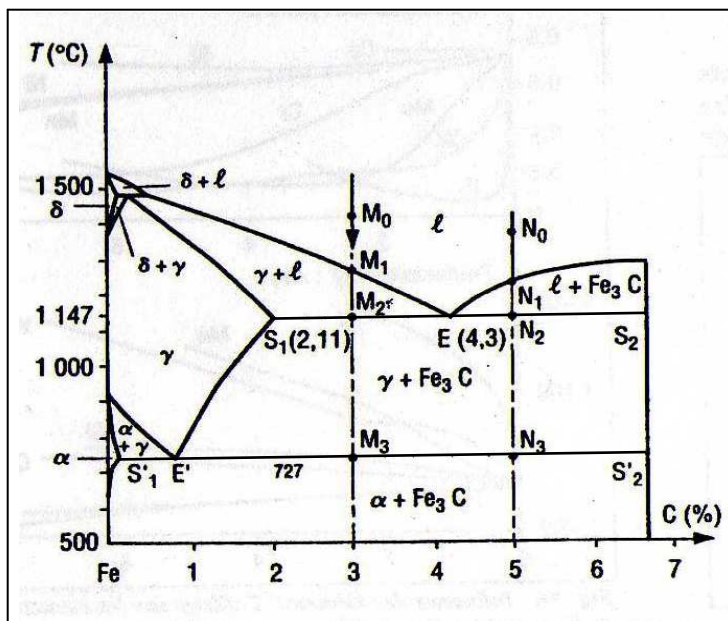


Figure-5: Transformation des fontes blanches [8].

a. Alliages hypoeutectiques, $x(S_1) < \%C < x(E)$

On prendra l'exemple d'un alliage à 3% C (point M). La température de coulée est celle de M_0 . En M_1 , la température de solidification commence, où il y a début de formation de cristaux d'austénite qui se développent jusqu'en M_2 , en général sous forme dendritique. La température étant relativement élevée, et lors du refroidissement la formation des phases liquide et solide est rapide.

- À $1148^\circ\text{C} + \varepsilon$, l'alliage est biphasé et constitué de dendrites d'austénite (γ) à environ 2% C et de liquide à 4,3% C, dont la fraction de l'austénite (γ) est :

$$y_\gamma = \frac{M_2E}{S_1E} \approx 0,60$$

- À 1148°C , le liquide se transforme en un agrégat eutectique (lédéburite) formé d'îlot de γ à 2% C dans une matrice de cémentite. On pourra vérifier aisément que les fractions massiques des deux phases (γ et Fe_3C) constituant l'eutectique sont pratiquement égales. On remarque que les dendrites de γ proeutectique n'ont subi aucune modification.
- En dessous de 1148°C et jusqu'à 727°C (point M_2 et M_3), il y a appauvrissement de γ en carbone (de 2 à 0,8%) avec la formation de cémentite proeutectoïde (ou secondaire).
- À 727°C , l'austénite ayant atteint la teneur eutectoïde qui se transforme entièrement en perlite.
- À la température ambiante, une fonte blanche hypoeutectique est donc constituée par une matrice de (P + CémII + eutectique) provenant de γ eutectique. Une fonte blanche conserve donc un faciès qui évoque la cristallisation dendritique initiale et la morphologie lédéburitique, d'autant plus marquée que la teneur en C se rapproche de E (**Figure-6**).

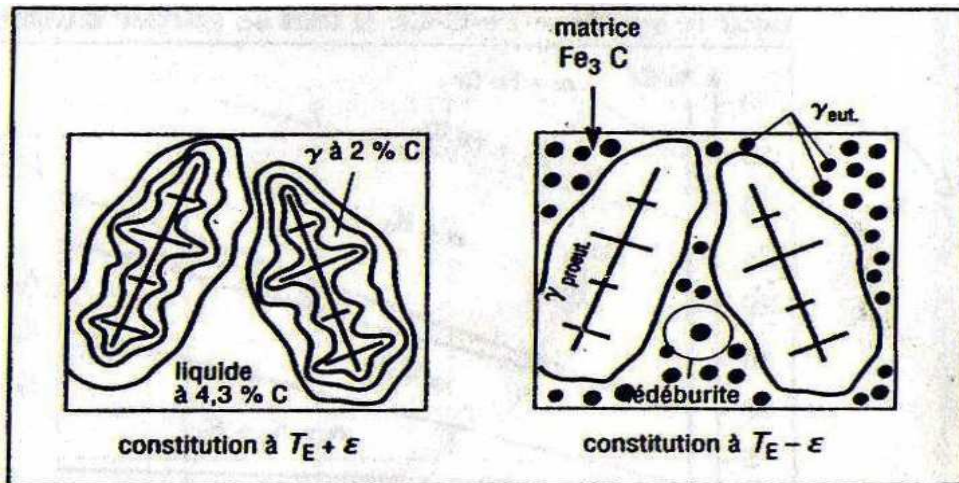


Figure-6: Fonte blanche hypoeutectique [8].

b. Alliages hypereutectiques, $x(E) < \%C < 6,7$

On prendra l'exemple d'un alliage à 5% C (point N). En N_1 la solidification commence par la formation de Fe_3C proeutectique (ou primaire) se développant en plaquettes rectilignes en contact avec le liquide.

- À $1148^\circ C + \epsilon$, l'alliage est biphasé et constitué de plaquette de Fe_3C primaire et d'un liquide à 4,3% C, la fraction de la cémentite (Fe_3C) est :

$$J_{Fe_3C} = \frac{EN_2}{ES_2} \simeq 0,30$$

- Par la suite, les transformations, qualitativement identiques à celle décrites précédemment pour les alliages hypoeutectique, conduisent, à la température ambiante, à une structure formée par une matrice de cémentite (eutectique + proeutectique) incluant de grandes plaquettes de Fe_3C primaire caractéristique de cette catégorie de fontes et des ilots d'euctoïde provenant de γ eutectique modifié. Là encore, la morphologie ledéburitique est conservée à la température ambiante (Figure-7).

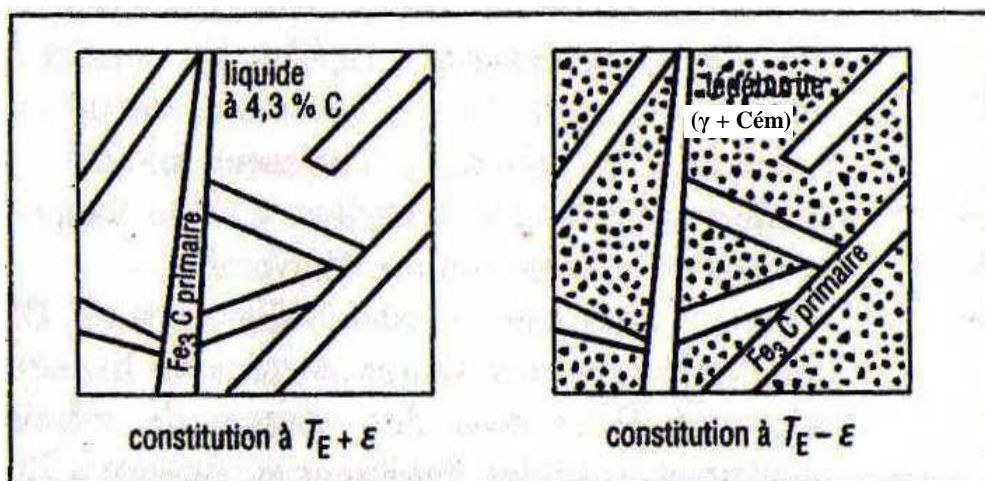


Figure-7 : Fonte blanche hypereutectique [8].

Composition : Les fontes blanches sont caractérisées par l'absence de graphite, due à la présence du manganèse (0,2 à 0,5%). Tout le carbone y est soit combiné (Fe_3C). La teneur en silicium varie de 0,5 à 1,5%.

Propriétés : Les fontes blanches commencent à fondre vers 1050°C . Elles sont très dures ($\text{HB} = 400$), très fragiles et ne se laissent travailler ni à la lime, ni aux machines-outils. Leur masse volumique moyenne est $7,6 \text{ kg/dm}^3$; leur allongement A est de l'ordre de 0,5%, et leur charge de rupture est de 16 daN/mm^2 par traction et 90 daN/mm^2 par compression.

Usages : Les fontes blanches, utilisées pour des pièces qui ne nécessitent pas d'usinage compliqué après le démoulage (cylindres de laminoirs, pièces de broyeurs etc).

Les fontes blanches sont donc essentiellement des fontes d'affinage, destinées à être transformées en acier. De ce point de vue, les fontes blanches phosphoreuses affinées par les procédés basiques (convertisseur Thomas, four Martin basique) sont les plus importantes.

Les fontes blanches riches en manganèse et notamment les "spiegels" (5 à 20% de Mn) sont fréquemment utilisées comme additions désoxydantes à la fin des opérations d'affinage, pour éliminer l'oxyde de fer qui pourrait subsister dans le bain [12].

Quelle que soit sa teneur en carbone, une fonte blanche est constituée d'une matrice quasi continue de cémentite. La cémentite est une phase dure (800 HV à 1000 HV) et très fragile. Les fontes blanches sont des matériaux sans possibilité de déformation à froid, leur intérêt réside dans leur grande résistance à l'usure et à l'abrasion (boulets de broyeurs, mâchoires de concasseurs, plaques d'usure). Les fontes blanches bénéficient également de la bonne coulabilité inhérente à la transformation eutectique et à la diminution de la température de solidification liées à la haute teneur en C [8].

Les carbures à base de fer ont des propriétés physiques très différentes de celles du graphite et, en particulier, leur dureté élevée augmente beaucoup celle de la fonte dont ils constituent une fraction volumique importante.

Pour la plupart des applications modernes (éléments de broyeurs, par exemple), les fontes blanches sont encore durcies par l'ajout d'éléments d'alliage (nickel, chrome, molybdène, vanadium, tungstène) avec une certaine amélioration de la ténacité aux chocs [13].

4.2. Fontes Grises

Les fontes ordinaires ont pratiquement des teneurs en carbone comprises entre 3 et 4%, en $\text{Si} < 3\%$, en $\text{Mn} < 1,2\%$, en $\text{P} < 1,2\%$.

Lorsque les conditions de refroidissement et de composition sont favorables à la graphitisation, on obtient une fonte grise dans laquelle une partie du carbone est sous forme de graphite.

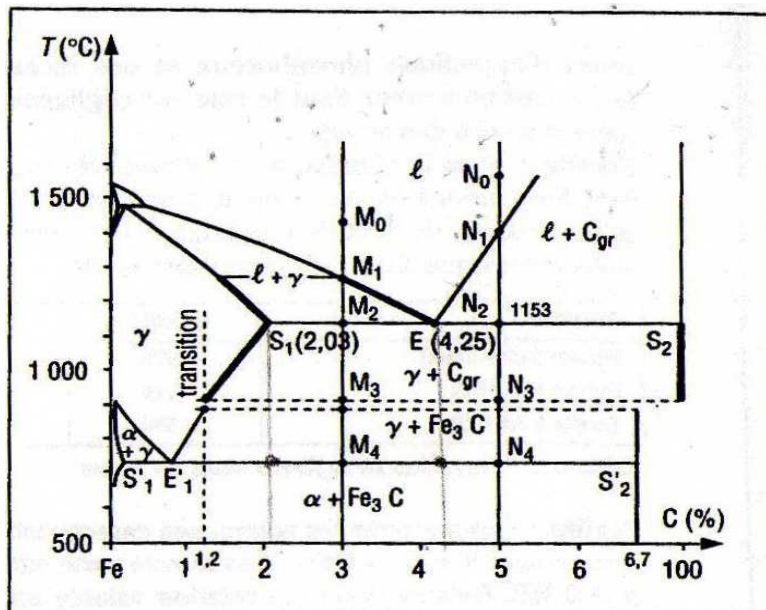


Figure-8 : Transformation des fontes grises [8].

Nous continuons notre étude sur le binaire Fe-C comme nous l'avons indiqué précédemment. La solidification d'une fonte grise a lieu entièrement sur le diagramme stable puis il y a transition sur le diagramme métastable pour certaine teneur en C de γ , teneur dépendant fortement des conditions de refroidissement (Figure-8).

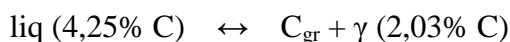
a. Alliages hypoeutectiques, $x(S_1) < \%C < x(E)$

On prendra l'exemple d'un alliage à 3% C (point M).

- En M_1 , la solidification commence par la formation de γ qui se développe sous forme de cristaux dendritiques en s'enrichissant progressivement en carbone comme la phase liquide.
- À $1153^\circ\text{C} + \varepsilon$, l'alliage est biphasé et formé de dendrites d'austénite à 2% C et de liquide à 4,25% C, la fraction de l'austénite (γ) est :

$$y_\gamma = \frac{M_2E}{S_1E} \approx 0,55$$

- À 1153°C , le liquide subit une transformation de type eutectique :



L'application de la règle des segments inverses montre que dans l'eutectique se vérifie la relation :

$$y_{\text{Cgr}} = \frac{ES_1}{S_1S_2} \approx 0,023$$

- Entre M_2 et M_3 , il y a appauvrissement de l'austénite en carbone par précipitation de graphite dit secondaire. Lorsque l'austénite atteint une teneur critique en carbone (1,2%), la graphitisation cesse et il y a transition sur le diagramme métastable.

À partir de ce moment, le graphite déjà formé n'intervient plus dans les transformations ultérieures qui sont assimilables à celles d'un acier hypereutectoïde à 1,2% C.

- En M_3 , les deux phases présentes sont γ à 1,2% C et le graphite (eutectique + secondaire).
- À 727°C, la phase γ se transforme intégralement en perlite.
- À la température ambiante, cette fonte grise hypoeutectique hypereutectoïde comprend trois constituants : perlite, cémentite proeutectoïde et le graphite lamellaire.

b. Alliages hypereutectiques, $x(E) < \%C < x(S_2)$

On prendra l'exemple d'un alliage à 5% C (point N).

- En N_1 , la solidification commence par cristallisation de graphite proeutectique (ou primaire) qui, comme tout constituant primaire, donne des lamelles de graphite très étendues et rectilignes.
- En N_2 , l'alliage est constitué de graphite primaire et d'austénite eutectique $\gamma(E)$.
- Les transformations sont alors celles décrites pour les alliages hypoeutectiques.

Cette étude sommaire montre bien qu'à partir d'une même fonte à l'état liquide on peut obtenir des constitutions dont des propriétés sont différentes en faisant varier le point de transition par action sur les conditions de refroidissement [8].

Composition : Ces fontes sont caractérisées par la faible proportion de carbone combiné par rapport au carbone libre. Ce fait est dû à la présence de 2 à 5% de silicium qui empêche la combinaison du carbone et du fer. Au dessus de 5% de silicium, on passe aux fontes grises au ferro-silicium.

Le phosphore abaisse la température de début de fusion de la fonte, donne au métal la fluidité à chaud et de la fragilité à froid. Les fontes pauvres en phosphore (0,04%) sont dites hématites, les fontes demi-phosphoreuses ou Cleveland en contiennent 0,8%, au dessus de 1%, la fonte est dite phosphoreuse.

Le manganèse favorise la combinaison du fer et du carbone, il semble donc indésirable dans les fontes grises ; cependant, comme il s'oppose aux effets néfastes de la présence du soufre, on maintient toujours sa teneur entre 0,5 et 1,5%.

Le soufre diminue la fluidité et provoque des soufflures ; on cherche à l'éliminer le plus possible (0,01 à 0,02%).

Propriétés : Les fontes grises ont une masse volumique de l'ordre de 7,1 g/cm³. Elles commencent à fondre au voisinage de 1150°C. Elles se laissent travailler à la lime et aux machines-outils (tour, perceuse, raboteuse,...). La ductilité et l'usinabilité des fontes grises sont d'autant plus grandes que les dimensions des particules de graphite sont plus petites.

Usage : Les fontes grises sont essentiellement des fontes de moulage. Les fontes grises riches en silicium sont utilisées comme additions, soit pour désoxyder les bains d'acier, soit pour maintenir à un taux convenable la teneur en silicium des fontes qui subissent la seconde fusion au cubilot [12].

On peut soumettre les pièces de fonte grise aux divers traitements thermiques énumérés ci-dessous.

- recuit de relaxation (vers 650°C), qui élimine les contraintes résiduelles, engendrées par un refroidissement hétérogène.
- recuit de ferritisation indirect ($P \rightarrow \alpha + G$ à la Température $< A_{1min}$), qui transforme la perlite en ferrite, ce qui entraîne une diminution de la dureté de la fonte et, par conséquent, une amélioration de son usinabilité.
- trempe (à partir de la température $> A_{1max}$) et revenu, qui permettent d'obtenir une matrice martensitique [11].

5. INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION

a. Le silicium

Le silicium se rencontre dans les fontes ordinaires sous des teneurs qui peuvent atteindre 3,5%, mais ne dépassent guère ce chiffre, pour lequel il se trouve encore à l'état dissous dans la ferrite. Le silicium exerce, dans la fonte, un rôle graphitisant [9].

Le silicium est un élément de graphitisation de base dans les fontes. Il abaisse la température du liquidus et élève celle du solidus, donc il diminue l'intervalle de solidification.

Une teneur trop élevée en silicium augmente la température de transition. Une augmentation de la teneur en silicium a tendance à augmenter la fraction ferritique de la structure donc à diminuer la dureté, ainsi que la résilience.

Pour une fonte entièrement ferritique, l'augmentation du silicium durcit la ferrite et accroît sensiblement la résistance mécanique [10].

b. Le manganèse

Le manganèse se rencontre dans les fontes sous des teneurs qui ne dépassent guère 2%. Nous avons vu que, pour des telles teneurs, le manganèse en excès sur la quantité nécessaire pour saturer le soufre à l'état de MnS se trouve principalement à l'état de Mn_3C , associé avec Fe_3C dans une cémentite au manganèse.

Stabilisant par ce moyen la cémentite, le manganèse, contrairement au silicium, est, pour les fontes, un élément trempant, s'oppose à la graphitisation et accroît la dureté de l'alliage [9].

Son effet antigrafitisant n'est sensible qu'à des taux élevés. Aux taux normaux 0,5 à 0,8%, il affine la perlite, augmente la dureté et la résistance à la traction [6].

c. Le soufre

Si le soufre est en excès par rapport au manganèse, il se forme du sulfure FeS, qui à chaud se dissout en partie dans Fe₃C : aussi, dans la cémentite formée à haute température, peut-on observer au refroidissement une précipitation de FeS en petite quantité [9].

d. Le phosphore

Le phosphore en faible teneur dans les fontes est en solution solide. En l'absence de carbone, la limite de solubilité de cet élément est de 1,7% dans la ferrite et s'établit dans l'austénite à un chiffre du même ordre. Cette limite étant supposée dépassée, il apparaît à la solidification, entre austénite saturée et Fe₃P, un eutectique à environ 10% P, qui au refroidissement se transforme en un agrégat de ferrite et de Fe₃P, à texture eutectique. En présence de carbone, la limite de solubilité du phosphore diminue beaucoup et l'eutectique apparaît sensiblement plus tôt qui devient un eutectique ternaire entre austénite saturée, Fe₃P et Fe₃C, à 1,95% C et 6,8% P, fondant à 953°C et qui, au refroidissement, se transforment en un agrégat de ferrite, de Fe₃P et de Fe₃C, à texture eutectique [9].

e. Le chrome

C'est un élément fortement antigraphitisant, c'est un stabilisateur de carbures, en retardant leur décomposition au chauffage, sa présence en grandes quantités peut donc avoir pour effet de blanchir les parties minces des moulages, d'où les irrégularités d'usinage et de la fragilité observées.

Il affine la perlite, augmente les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion [10].

f. Le nickel

Eléments graphitisants de solidification surtout aux basses teneurs de silicium. On peut admettre qu'un taux de Nickel agit au même titre que $\frac{1}{4}$ du taux de silicium. (généralement Si = 4Ni).

Il affine le graphite et évite la formation de carbures dans les arêtes et les parties minces des moulages (nervures, ailettes, .. etc).

Il diminue le pouvoir trempant des fontes, et de ce fait, atténue les variations de structure et facilite l'usinage [6].

g. Le cuivre

Elément graphitisant à la solidification surtout aux basses teneurs en silicium, il contribue fortement à l'affinement de la perlite par son action gamagène. En outre le cuivre est un élément anti-fertisant. Il favorise l'obtention d'une matrice perlitique, à l'état brut de coulée. Son introduction dans la fonte entraîne une augmentation de la résistance au choc et de la dureté. Un taux croissant de Cu permet d'obtenir :

- une matrice ferrito — perlitique pour 0,3 à 0,5 % de Cu;
- une matrice perlitique pour 1 % de Cu [6].

6. PROPRIÉTÉS DES FONTES

Les fontes sont des alliages Fe-C dont le titre en carbone théoriquement compris entre 1,9 et 6,67% oscille entre 3 et 4% pour la plupart des fontes industrielles. Leurs constituants et leurs propriétés dépendent évidemment de ce titre en carbone, mais la forme sous laquelle existe cet élément joue un rôle prépondérant.

Deux fontes contenant la même quantité de carbone (3% par exemple), possèdent des propriétés très différentes selon qu'on y trouve du graphite (C libre) ou de la cémentite (Fe_3C).

Pratiquement d'après la couleur de leur cassure, on distingue :

- les fontes grises ;
- les fontes blanches.

Pour une même composition, un refroidissement lent conduit à l'obtention d'une fonte grise, tandis qu'un refroidissement rapide permet d'obtenir une fonte blanche.

Le **tableau-1** donne les domaines de composition des divers types de fontes.

Tableau-1: Domaines de composition des fontes [11].

Type de fonte	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)
Blanche	3,3 à 3,6	0,4 à 1,2	0,25 à 0,80	0,06 à 0,20	0,05 à 0,20
Grise	3,0 à 3,7	1,2 à 2,5	0,25 à 1,0	0,02 à 0,25	0,05 à 1,0
Malléable	2,0 à 2,6	1,0 à 1,6	0,20 à 1,0	0,04 à 0,20	< 0,20
GS	3,0 à 4,0	1,8 à 3,0	0,10 à 0,80	< 0,03	< 0,10

Le **tableau-2** donne les propriétés mécaniques des divers types de fontes.

Tableau-2: Propriétés mécaniques des fontes [11].

Type De fonte	Classe ASTM	Etat	Matrice*	Propriétés mécaniques				
				Re _{0,2}	R _m (traction) (MPa)	R _m (compressi on) (MPa)	A (%)	Dureté HB
Blanche		Brut de Fonderie	P	–		–	0	400 à 600
Grise	20 30 40 60	Brut de fonderie	F et P F et P P P	– – – –	150 215 290 430	570 750 965 1290	0 0 0 0	155 210 235 300
Malléable	35018 45008 M7002	Recuit Recuit Trempe et revenu	F F et M M	240 310 480	365 450 620	– – –	18 8 2	150 180 250
GS	60-40- 18 80-55- 06 120-90- 02	Recuit Brut de fonderie Trempe et revenu	F P et F M	280 420 630	385 560 840	– – –	18 6 2	170 200 270

6.1. Types de graphite

Quelle que soit la composition de la fonte et la forme de graphite, celui-ci est toujours constitué de carbone pratiquement pur.

Le système cristallin du graphite est formé de couches à disposition hexagonale non compacte (il n'y a pas d'atome au centre des hexagones), glissant facilement l'une sur l'autre. Grâce à cette structure, le graphite joue un rôle lubrifiant, qui explique les qualités de frottement et l'usinabilité généralement bonne des fontes qui en contiennent.

Du point de vue de la forme du graphite, il y a lieu de distinguer les fontes à graphite sphéroïdal (G.S), et les fontes nodulaires à graphite non sphéroïdal [9].

a. Graphite sphéroïdal

Divers procédés, tous d'origine récente, permettent, au cours même du processus de solidification et de refroidissement en moule, d'obtenir, dans les fontes voisines de la composition eutectique, le graphite à l'état de nombreux nodules de forme très régulière.

Le premier de ces procédés reposait sur l'addition, dans une fonte légèrement hypereutectique, de cérium (Ce) en excès par rapport au soufre.

Par la suite on a constaté que d'autres éléments que le cérium permettaient également d'obtenir en proportion plus ou moins grande le graphite sphéroïdale : des métaux alcalins (Li, Na, K) ou alcalino-terreux (Mg, Ca, Ba, Sr), des métalloïdes (B, S). On a remarqué d'autre part que l'action sphéroïdisante pouvait être inhibée par d'autres additions, par exemple celle du magnésium additionné d'une teneur en bismuth aussi faible que 0,0003%.

Cependant, d'après les essais systématiques du Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF), le calcium, les fluorures des terres rares, ou les chlorures alcalins, lorsqu'ils sont employés seuls, ne conduiraient pas à des fontes à graphite sphéroïdal : l'effet sphéroïdisant ne serait obtenu que conjointement avec une petite quantité de magnésium ou de cérium.

Industriellement, on utilise à l'heure actuelle l'addition :

- de magnésium (0,08 à 0,10%, pour une teneur en soufre de 0,04%), introduit sous forme d'alliage Fe-Si-Mg (8% Mg dans un ferro-silicium à 50%), ou mieux d'alliage Ni-Mg à 15% ;
- d'un mélange de chlorures de sodium et de magnésium et de silico-calcium à 30% Ca.

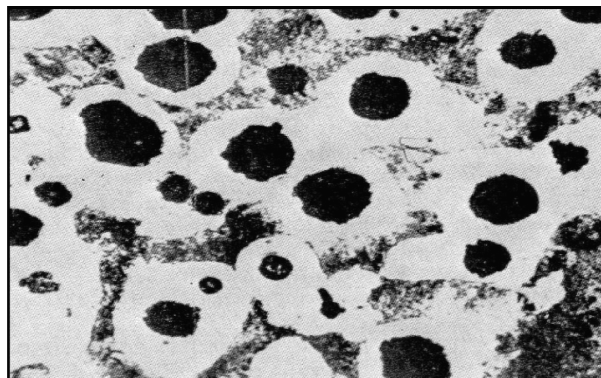


Figure-9: *Le graphite sphéroïdal [9].*

b. Graphite lamellaire

Lorsqu'une fonte hypoeutectique n'a pas reçu les additions qui conduisent au graphite sphéroïdal, la solidification y fait d'abord apparaître des dendrites d'austénite, entre lesquelles le liquide-mère vient ensuite former des cellules d'eutectique binaire Fe-Fe₃C.

La présence du silicium et du manganèse dans les phases de l'eutectique en étale la solidification sur un intervalle notable. C'est la période, où, dans la partie déjà solidifiée des cellules, la décomposition de Fe₃C est la plus active.

La décomposition de la cémentite donne naissance à du graphite, qui se présente sous deux formes principales :

- *le graphite punctiforme ou vermiculaire* : correspond à un retard à l'amorçage de la décomposition de Fe_3C ; on le rencontre donc plutôt au centre des cellules.
- *Le graphite lamellaire* : se présente sous le microscope en élément allongés et plus ou moins incurvé, souvent effilés à leurs extrémités et disposés en gros suivant les rayons de la cellule à laquelle ils appartiennent.



Figure-10: *Le graphite lamellaire* [17].

L'American Society for Testing Materials (NF 32-100) a publié une classification des différents types de graphite, fondée à la fois sur la forme et sur les dimensions des éléments de ce constituant.

Quant à la forme, cette classification distingue cinq types fondamentaux, à savoir (**Figure-11**):

- type A : graphite en lamelles de distribution uniforme, d'orientation désordonnée ;
- type B : graphite en rosettes, d'orientation désordonnée ;
- type C : graphite en lamelles de tailles diverses, d'orientation désordonnée ;
- type D : graphite interdendritique, d'orientation désordonnée ;
- type E : graphite interdendritique, d'orientation privilégiée.

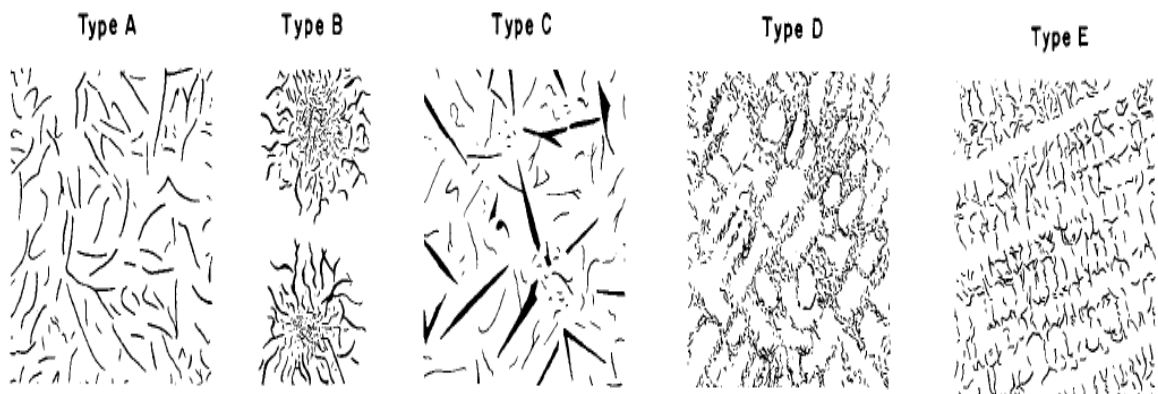


Figure-11 : *Les différents types de forme de graphite* [14].

Quant aux dimensions, elles les répartissent dans les huit groupes suivants :

- dimension 1 : supérieure à 1 mm
- dimension 2 : de 0,5 à 1 mm
- dimension 3 : de 0,25 à 0,5 mm
- dimension 4 : de 0,12 à 0,25 mm
- dimension 5 : de 0,06 à 0,12 mm
- dimension 6 : de 0,03 à 0,06 mm
- dimension 7 : de 0,0015 à 0,03 mm
- dimension 8 : inférieure à 0,0015 mm

Un type de graphite donné sera donc repéré au moyen de deux indices. Une lettre précisant sa forme et un chiffre précisant ses dimensions. C'est ainsi que le graphite repéré par le symbole A4 est un graphite en lamelles réparties uniformément et dont les dimensions sont entre 0,12 et 0,25 millimètres.

Certaines impuretés de la fonte peuvent avoir une action importante sur la forme et les dimensions des éléments de graphite non sphéroïdal. L'une des plus nocives à cet égard est le plomb, qui, déjà pour des teneurs de l'ordre de 0,01%, effile les lamelles de graphite à leurs extrémités et tend à les ramifier [9].

6.2. Fontes grises à graphite lamellaire

Ces fontes sont peut-être plus connues sous le nom de fontes ordinaires car ce sont les plus anciennement utilisées en construction mécanique, en architecture métallique, chauffage domestique et industriel, équipement de voirie. Aujourd'hui encore, elles ont une place prépondérante en fonderie.

Leur structure comprend essentiellement du graphite en lamelle, ramifiées et arrangées en ensembles cellulaires, incluses dans une matrice le plus souvent perlitique ou perlito-ferritique (voir la **Figure-12**).

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- leur résistance à la traction ne dépasse guère 400 MPa mais elles ont un meilleur comportement en compression, donc en flexion ;
- leur dureté est modérée (200-280 HB) ;
- elles sont très facilement usinables et résistent particulièrement bien à l'usure sans grippage ;
- elles amortissent bien les vibrations ;
- elles résistent bien aux corrosions courantes et à la chaleur ;
- elles reçoivent couramment des revêtements protecteurs : émaillage, bleuissage [13].



Figure-12: *Microstructure typique d'une fonte à graphite lamellaire*
Attaquée au Picral à 4% × 100 [15].

Ces fontes sont caractérisées par leur coût peu élevé (pas de traitement thermique). En revanche leur diagramme de traction est peu favorable pour les hautes sollicitations (limite d'élasticité indéterminée, module d'élasticité variable, allongement de rupture inférieur à 1%, charge de rupture atteignant au maximum 450 MPa, sensibilité aux chocs); leur comportement en flexion et surtout en compression est nettement meilleur. Elles font l'objet de la norme NF A 32-101 [7].

6.3. Fontes grises à graphite sphéroïdal

L'élaboration de la fonte à graphite sphéroïdal consiste en un traitement de sphéroïdisation suivi d'une inoculation au ferro-silicium, d'un bain de fonte à liquide de composition chimique et de pureté bien défini.

Il est nécessaire notamment de désulfurer préalablement le bain si la teneur en soufre est trop élevée supérieur à 0.04% et de le carburer si le pourcentage en carbone est trop bas (inférieur à 3.4%).

L'obtention de la fonte G.S se fait par un traitement de la fonte liquide au magnésium qui en abaissant la teneur en soufre et en oxygène de la fonte, permet au graphite de prendre la forme sphéroïdal en plus de ça le magnésium augmente ainsi considérablement les caractéristiques mécaniques de la fonte.

L'inoculation peut se faire séparément ou successivement à la poche, dans le jet de coulée ou à l'entrée du système de coulée (post-inoculation) en utilisant des produits en poudre ou sous forme de petits morceaux déposés dans une cavité dû canal de coulée [16].

Inventées en 1948, les fontes GS ou "ductiles" ont pris une extension particulière dans les domaines suivants :

- canalisations centrifugées jusqu'à 2 m de diamètre ;
- robinetterie industrielle et accessoires (vannes, brides, clapets...) ;
- voirie (tampons de fermeture, grilles, avaloirs...) ;
- pièces hautement fonctionnelles ou de sécurité en construction automobile (vilebrequins, bras de suspension, étriers de freins...).

Les propriétés mécaniques approchent celles des aciers ; en particulier, les nuances ferritiques sont douées de ténacité et de plasticité. Leur technique de fabrication est bien maîtrisée en général mais nécessite une élaboration métallurgique spéciale (basse teneur en soufre). Les fontes GS normalisées (NF A 32-201) ont une résistance minimale à la traction de 370 à 800 MPa avec allongement de rupture de 1,7 à 2% et limite d'élasticité à 0,2% imposée [7].

Les fontes à graphite sphéroïdal –fontes GS –, dites aussi parfois fontes ductiles, sont sous forme de particules quasi sphérique (10 à 100 μm de diamètre). A part cette différence capitale, la matrice métallique est comparable à celle d'une fonte grise ordinaire (**Figure-13**) [13].

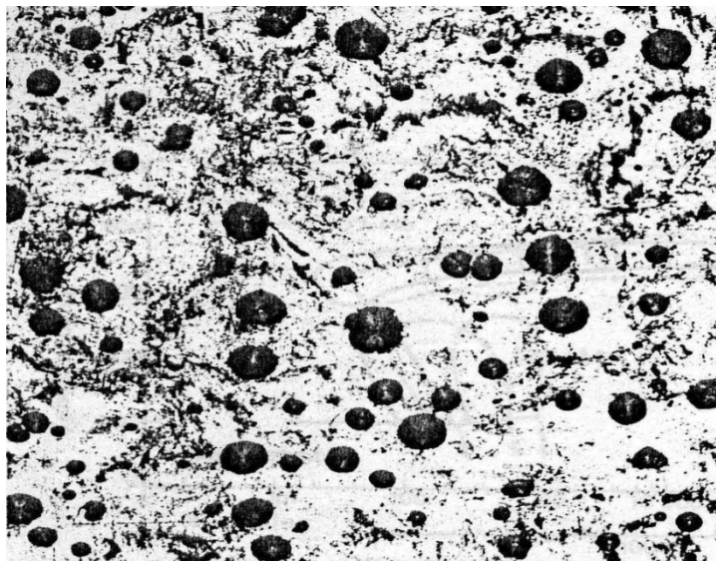


Figure-13: *Microstructure typique d'une fonte à graphite sphéroïdal*
Attaquée au Picral à 4% \times 100 [15].

7. LES FONTES G.S BAINITIQUES

Les fontes ductiles à graphite sphéroïdal ou nodulaire sont des matériaux bien établis dans le domaine de la construction mécanique. Un des développements récents consiste à effectuer un procédé à traitement thermique par trempe étagée pour obtenir une matrice bainitique. Dans de nombreux cas, ces fontes G.S bainitiques peuvent être considérées comme étant compétitives avec les aciers forgés. En outre, les coûts de production globaux des pièces en fonte G.S bainitique peuvent être inférieurs de 20 à 30% à ceux de pièces équivalentes en acier forgé, compte tenu des coûts inférieurs de matières premières, d'usinage et d'énergie.

7.1. La production des fontes G.S bainitiques

Le premier stade est la production d'une pièce en fonte G.S de haute qualité en utilisant de nombreuses techniques de fonderie bien établies.

Le développement le plus récent est l'application d'un traitement thermique par trempe étagée sur les fontes G.S pour obtenir une variété de structures à matrice bainitique. Le cycle de traitement thermique est représenté schématiquement dans la **Figure-14** et comprend les opérations suivantes:

- Austénitisation, généralement pendant 1 heure à 900°C.
- Trempe rapide à une température préétablie dans la plage de 235 à 450°C.
- En la maintenant à cette température, l'austénite se transformera isothermiquement en bainite. Le temps de maintien typique est de 1 à 2 heures.
- Refroidissement des pièces à température ambiante.

Le milieu de trempe le plus fréquemment utilisé est un mélange de sels fondus (nitrate de sodium, nitrite de sodium et nitrate de potassium) qu'on pourra utiliser dans la plage entière de température de trempe étagée (235-450°C). On peut utiliser également un autre milieu de trempe, à savoir l'huile chaude qui est placée dans un réservoir chauffé et qui est protégée avec une couche d'azote pour la prévention des incendies [15].

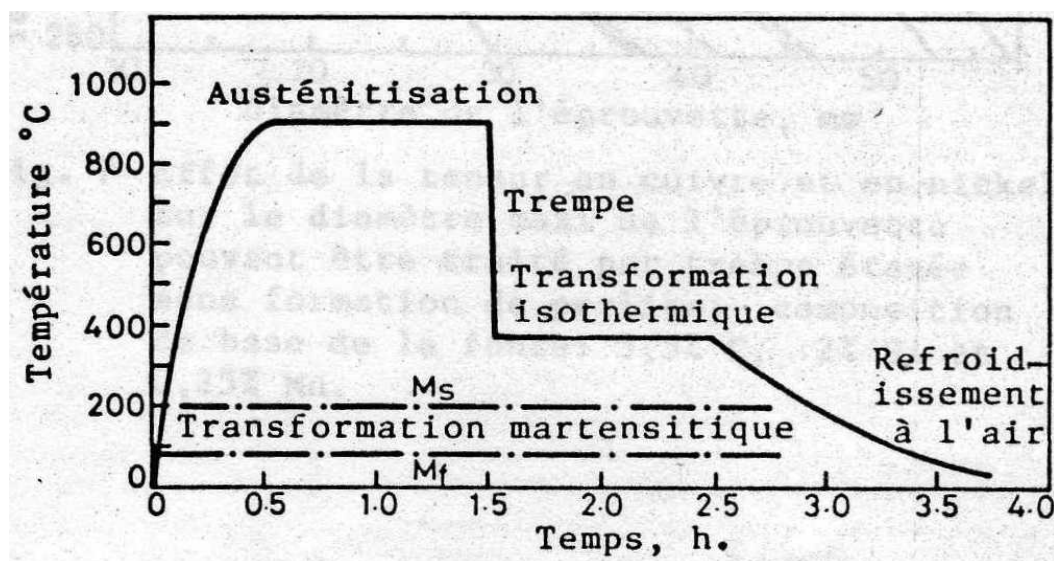


Figure-14: Schéma d'un cycle de traitement thermique par trempe étagée typique [15].

7.2. Les propriétés des fontes G.S bainitiques

Avec des températures basses de trempe étagée (environ 235 - 250°C), on obtient de la bainite inférieure, qui se compose d'une phase ferritique aciculaire contenant des carbures extrêmement fins (**Figure-15**). Les fontes G.S à structure bainitique inférieure présentent des valeurs de dureté élevée (jusqu'à 500 HB), et peuvent être très résistantes avec des charges de rupture de l'ordre de 1200 à 1600 N/mm², mais leur ductilité est limitée (1 - 3% à la rupture).

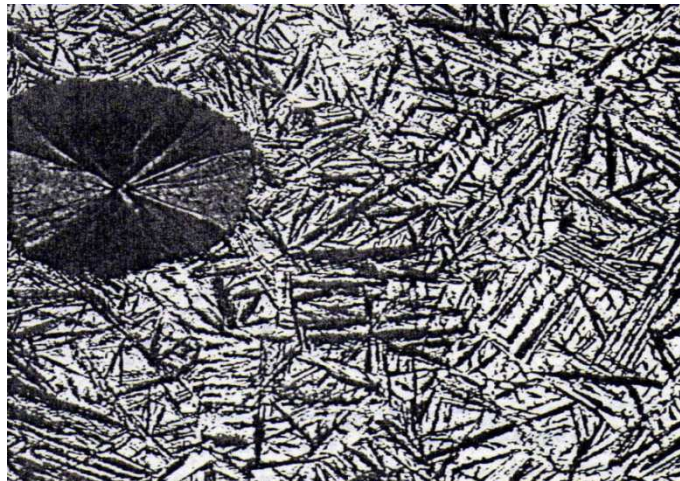


Figure-15: *Microstructure d'une fonte traitée par trempe étagée à 325°C avec une matrice de bainite inférieure.*
Attaquée au Nital 2% × 500 [15].

Avec des températures élevées de trempe étagée (environ 370 – 450°C), on obtient de la bainite supérieure qui se compose d'un mélange de ferrite pennée, exempte de carbure et parsemée d'austénite résiduelle (**Figure-16**). Les fontes G.S à matrice bainitique supérieure présentent une dureté inférieure (280 - 320 HB) et une charge de rupture comprise dans la plage 900 à 1050 N/mm² ainsi qu'une ductilité beaucoup plus élevée avec des allongements à la rupture de l'ordre de 6 à 15%.

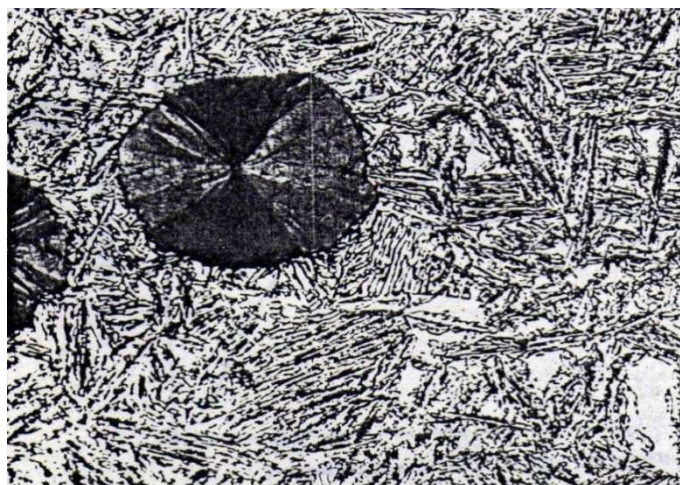


Figure-16: *Microstructure d'une fonte traitée par trempe étagée à 375°C avec une matrice de bainite supérieure.*
Attaquée au Nital 2% × 500 [15].

Avec des températures intermédiaires (environ 330 - 370°C) il est souvent difficile de faire une distinction claire entre les deux formes de bainite, on définira ces structures comme des structures mixtes de bainite inférieure et supérieure (**Figure-17**). Les fontes G.S présentant une structure bainitique mixte ont une charge de rupture comprise dans l'intervalle 950 à 1250 N/mm² et des ductilités dans la plage de 3 à 6% d'allongement.

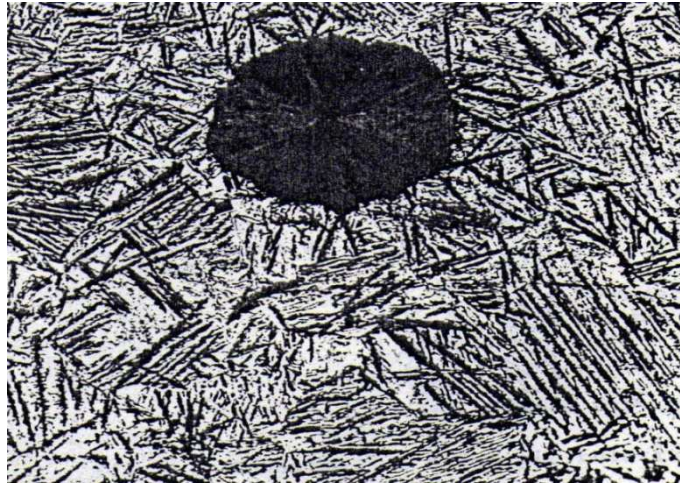


Figure-17: *Microstructure d'une fonte traitée par trempe étagée à 350°C avec une structure mixte de bainite. Attaquée au Nital 2% × 500 [15].*

Les fontes G.S bainitiques ont connu un succès particulier aux Etats-Unis et dans certains pays d'Europe, mais d'autres pays commencent maintenant à s'intéresser aux avantages techniques et économiques qu'elles présentent. Jusqu'à maintenant, ces matériaux ont été utilisés dans les domaines les plus divers, parmi lesquels on indiquera les engrenages pour le secteur de l'automobile et de la mécanique générale, des vilebrequins, différentes pièces pour moteurs et véhicules ainsi que des pièces pour véhicules tous terrains tels que les engins de terrassement, les véhicules de combat et le matériel agricole [15].

8. LES FONTES MALLEABLES

Les fontes malléables sont des fontes qui acquièrent une résistance et une capacité de déformation par des traitements thermiques appropriés.

Au cours du traitement thermique de recuit, le carbone contenu dans la fonte blanche est totalement ou partiellement éliminé, la fonte obtenue est une fonte **malléable à cœur blanc**, soit précipité dans la structure métallique sous forme de flocons ou de nodules de graphite ; il s'agit alors d'une **malléable à graphite nodulaire** (voir la **Figure-18**).

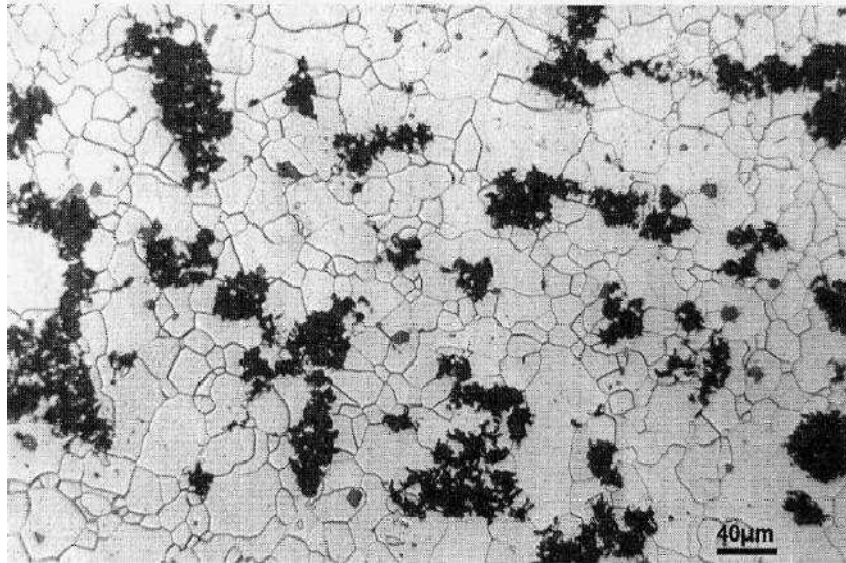


Figure-18: Fonte malléable à graphite nodulaire [17].

Il existe donc deux procédés différents d'obtention des fontes malléables, avec, pour chacun d'eux, un certain nombre de techniques particulières, et deux grandes familles de fontes malléables :

- un **procédé de malléabilisation par décarburation de la fonte blanche** grâce à un recuit en milieu oxydant, qui conduit à l'obtention de la malléable à cœur blanc en raison de la couleur de la cassure du métal obtenu ;
- un **procédé de malléabilisation par graphitisation**, c'est-à-dire par précipitation du carbone d'une fonte blanche sous forme de graphite au cours d'un recuit non oxydant. Ce procédé conduit à l'obtention des malléables à graphite nodulaire, matériau longtemps dénommé *malléable américaine*, pour des raisons historiques, ou *malléable à cœur noir*, en référence à l'aspect de la cassure du métal [18].

8.1. Les propriétés des fontes malléables

a) Malléables à cœur blanc

- soudabilité : c'est la seule fonte exempte de graphite, donc parfaitement et facilement soudable, sans risque de création de carbures dans la zone affectée thermiquement par la soudure ;
- grande facilité de galvanisation à chaud en raison du faible taux de silicium et de l'absence de graphite en surface ;
- bonne tenue à chaud ;
- bonne aptitude au polissage.

b) Malléables nodulaires ferritiques

- excellente usinabilité, grâce à la présence de nodules de graphite ;
- bonne résistance aux chocs à basse température (norme NF A 32-160) ;
- limite et module d'élasticité élevés ;
- bonne aptitude à la galvanisation à chaud.

c) Malléables nodulaires perlitiques :

- caractéristiques mécaniques élevées ;
- bon comportement à l'usure par frottement ;
- bonne usinabilité en raison de l'obtention de la structure perlitique par traitement thermique ;
- bonne aptitude aux traitements superficiels (trempe à haute fréquence).

d) Malléables nodulaires bainitiques :

- très hautes caractéristiques mécaniques associées à une bonne ductilité ;
- possibilité d'écrouissage en service, augmentant la limite de fatigue ;
- très bonne résistance à l'usure par frottement et abrasion.

8.2. Les domaines d'applications

Les propriétés des fontes malléables conduisent aux applications dans de nombreux domaines, par exemple :

- automobile et poids-lourds : carters et boîtiers de différentiel, culbuteurs, fourchettes, moyeux, pièces de freins et de boîtes de vitesses automatiques, etc. ;
- tracteurs et machinisme agricole ;
- matériel ferroviaire : wagons, selles de rails, supports d'appareillage de contrôle, coussinets de glissement d'aiguillage, pièces de suspension de caténaires, etc. ;
- matériel de travaux publics ;
- électrification : capots d'isolateurs, palonniers, pinces, etc. (pièces galvanisées) ;
- quincaillerie : raccords, chapeaux de bouteilles de gaz, étaux et outillage à main ;
- robinetterie : vannes, volants ;
- bâtiment : pièces d'étais et d'échafaudages, pièces de précontrainte ;
- équipement routier : pièces de garde-corps et de signalisation ;
- électroménager : pièces de compresseurs et de conditionneurs d'air [18].

9. TRAITEMENTS THERMIQUES DES FONTES

Comparées aux autres matériaux métalliques, les fontes offrent aux utilisateurs un large choix de caractéristiques pour un prix intéressant, compte tenu des matières premières employées et de la facilité d'élaboration. Toutefois, certaines catégories de fonte intègrent le traitement thermique dans le cycle de fabrication, tandis que d'autres voient leur domaine d'emploi sensiblement élargi grâce à des traitements thermiques appropriés.

Pour les fontes non alliées ou faiblement alliées, le traitement thermique permet :

- la réduction des contraintes internes ;
- l'accroissement de l'usinabilité ;
- l'obtention d'une bonne ténacité ;
- l'augmentation des caractéristiques mécaniques ;
- l'augmentation de la résistance à l'usure.

Le **tableau-3** indique le but des différents traitements applicables aux fontes et définit les conditions d'utilisation, en précisant s'il s'agit d'un traitement intégré au cycle de fabrication ou non. Ces traitements, indépendants les uns des autres (ils ne constituent pas une gamme de fabrication), ont pour but d'aboutir à une microstructure et à un état de contraintes internes qui

assurent les propriétés d'emploi comme la dureté, la ténacité, la résistance à l'usure, le comportement en fatigue [19].

Tableau-3: Opérations de traitements thermiques des fontes moulées [19].

Opération	Nature	But	Conditions d'utilisation
Traitement de détente	<ul style="list-style-type: none"> • Chauffage à une température inférieure à celle de la transformation $\alpha-\gamma$ (550 à 650 °C) (fontes non alliées) ou à celle de la température de revenu (fontes alliées) 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer les risques de rupture en service en réduisant les contraintes résiduelles de tension de solidification ou introduites lors d'opérations d'usinage ou de rectification 	<ul style="list-style-type: none"> • Recommandé pour des pièces ayant de fortes variations d'épaisseur ou de forme complexe
Traitement d'adoucissement	<ul style="list-style-type: none"> • Recuit complet à haute température, supérieure à 900 °C (notamment malléabilisation) • Recuit à température moyenne, supérieure à la température de transformation $\alpha-\gamma$ • Recuit à basse température, au-dessous de l'intervalle de transformation $\alpha-\gamma$ (ferritisation) 	<ul style="list-style-type: none"> • Faciliter l'usinage • Améliorer la ductilité • Améliorer la tenue aux chocs des fontes à graphite sphéroïdal • Abaisser le niveau de dureté 	<ul style="list-style-type: none"> • Recuit complet réalisé par le fondeur dans le cycle de fabrication de la fonte malléable et des fontes à graphite lamellaire coulées en moule métallique • Effectué occasionnellement pour l'élimination des carbures libres indésirables • Recuit à température moyenne pour dissoudre de fins carbures dispersés conduisant à une dureté trop élevée • Recuit de ferritisation par dissociation de la perlite correspondant à une dureté trop élevée
Traitement de normalisation ou d'homogénéisation	<ul style="list-style-type: none"> • Refroidissement à l'air à partir d'une température supérieure à l'intervalle de transformation $\alpha-\gamma$ ou à la suite d'un traitement de recuit à haute température 	<ul style="list-style-type: none"> • Accroître la dureté et les caractéristiques mécaniques par rapport à celles obtenues à la coulée • Améliorer la résistance à l'usure tout en conservant une usinabilité raisonnable • Avoir une excellente réponse à la trempe superficielle par induction ou au chalumeau 	<ul style="list-style-type: none"> • Deuxième phase du traitement de malléabilisation pour une nuance perlitique • Mise en conformité avec le cahier des charges : pièces refroidies trop lentement, par exemple, dans le moule au lieu d'avoir été décochées avant que leur température n'atteigne celle de l'intervalle de transformation $\alpha-\gamma$ • Pièces destinées à être trempées superficiellement
Traitement de durcissement	<ul style="list-style-type: none"> • Chauffage à température supérieure à celle de l'intervalle de transformation suivi d'une trempe directe ou isotherme et d'un revenu 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtenir la dureté la plus élevée possible pour répondre aux exigences de service de la pièce • Améliorer durablement la résistance à l'usure • Obtenir le meilleur compromis résistance mécanique/tenue aux chocs 	<ul style="list-style-type: none"> • Pièces soumises à une forte usure (pression élevée) • Pièces en fontes à graphite lamellaire ou sphéroïdal à très hautes caractéristiques mécaniques • Pièces en fonte GS légèrement alliées à caractéristiques élevées y compris aux chocs
Traitement superficiel	<ul style="list-style-type: none"> • Trempe superficielle, refroidissement à l'eau après chauffage (induction, chalumeau) à température supérieure à l'intervalle de transformation $\alpha-\gamma$ • Diffusion de carbone • Diffusion d'azote • Diffusion simultanée des deux éléments • Diffusion soufre/azote 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtenir une résistance à l'usure élevée tout en conservant des propriétés de ductilité de l'alliage au cœur de la pièce • Accroître la résistance à la fatigue et au grippage • Améliorer la tenue à l'oxydation 	<ul style="list-style-type: none"> • Pièces à structure perlitique (caractéristique élevée) pour lesquelles la tenue au frottement est associée à une bonne ductilité et/ou pour lesquelles un bon comportement en fatigue est nécessaire. Selon l'épaisseur de la pièce concernée par l'usure, le choix du traitement se portera sur le traitement thermique seul (forte épaisseur : millimètre) ou sur un traitement thermo-chimique (quelques centaines de micromètres)

9.1. Traitements thermiques de graphitisation

a) Traitement de perlitisation

Ce traitement de graphitisation a été appliqué à toutes les fontes présentant des carbures de solidification (fontes truitées). Il a été représenté sur la **Figure-19-a**. L'austénitisation des échantillons ou des éprouvettes de traction et de résilience ont subi un refroidissement lent de θ_γ à $A1_{\min}$ (limite inférieure de la bande triphasée), puis un refroidissement à l'air.

b) Traitement de ferritisation

On distingue deux types de ferritisation :

- La ferritisation directe ($\gamma \rightarrow \alpha + G$), s'obtient à une température inférieure à $A1_{\min}$ de la bande triphasée. Le refroidissement ultérieur s'est fait à l'air (voir **Figure-19-b**) ;
- La ferritisation indirecte ($P \rightarrow \alpha + G$), s'obtient à une température située dans l'intervalle [$A1_{\min} - A1_{\max}$].

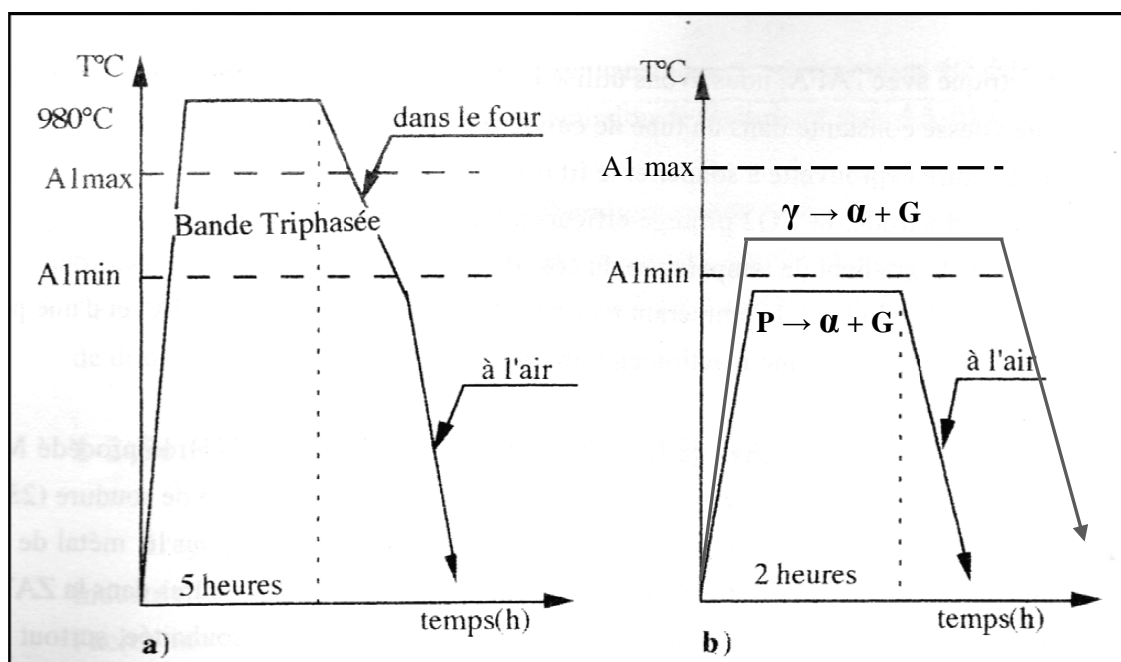


Figure-19: Schémas des cycles de traitements thermiques de perlitisation (a) et de ferritisation (b) [20].

9.2. Traitements thermiques de type martensitique

Il est possible d'obtenir des fontes G.S possédant une matrice essentiellement composée de martensite. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une première étape d'austénitisation de la matrice, suivie d'un refroidissement avec une vitesse appropriée (rapide), de façon à former de la martensite.

Une dernière étape de revenu est généralement réalisée afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées (résistance, ductilité et ténacité) et de réduire les contraintes induites lors de la trempe. Le schéma de la **Figure-20** présente le cycle thermique correspondant [21].

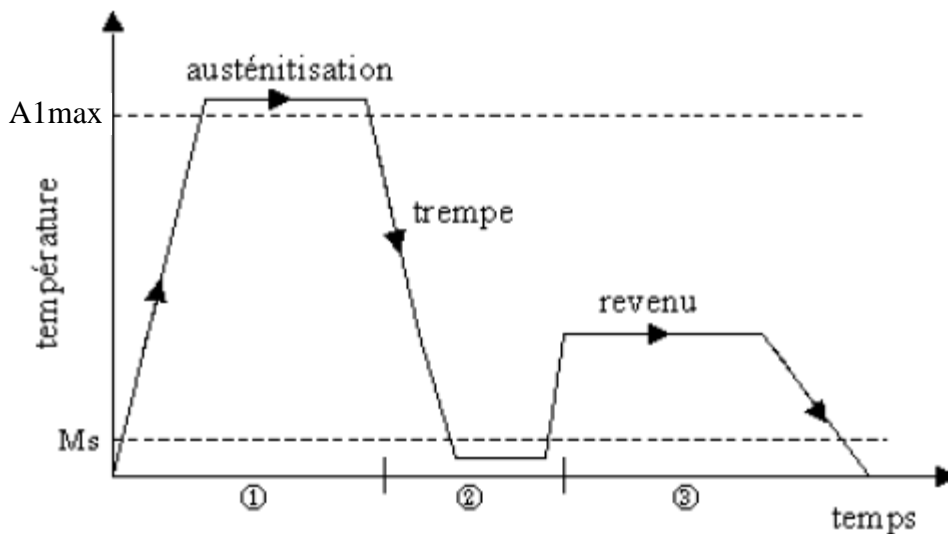


Figure-20: *Traitement thermique de trempe martensitique suivie d'un revenu* [21].

Le revenu de la fonte G.S trempée, entraîne la décomposition de la martensite et de l'austénite résiduelle en ferrite et en carbures tout en relaxant les contraintes résiduelles de la trempe. Ceci a pour conséquence de diminuer la dureté, la résistance à la traction et la limite d'élasticité des fontes trempées, tout en augmentant la ductilité. Lorsqu'une dureté maximale est recherchée, la température choisie sera comprise entre 150 et 200°C, en raison de la formation d'amas de carbone, puis de fins de carbure. Cette caractéristique mécanique diminue ensuite à mesure que ces particules grossissent et perdent de leur cohérence. Pour des températures de revenu plus élevées, la dureté va diminuer, en retrouvant une valeur analogue à celle des fontes G.S ferritiques pour les plus hautes températures (**Figure-21**) [22].

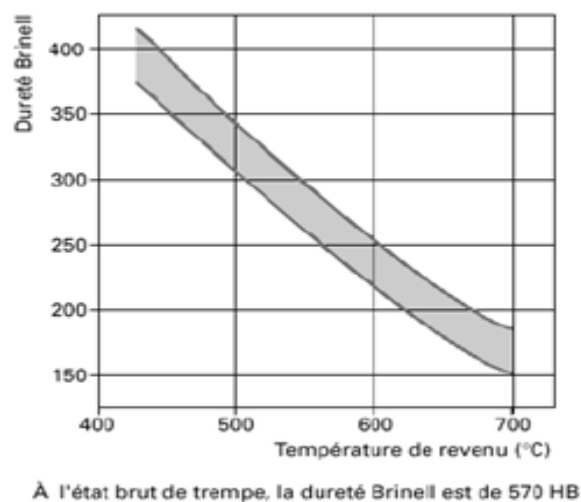


Figure-21: *Influence de la température du revenu, après trempe à l'huile, sur la dureté* [22].

CHAPITRE-II : **TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

Les conditions d'élaboration de la fonte exercent une influence sur la structure et les caractéristiques mécaniques.

Nous avons également décrit dans ce chapitre les différentes techniques expérimentales utilisées

1. MATERIAUX UTILISÉS

Nous avons utilisé dans notre étude les fontes grises à graphite sphéroïdale **GSC** et **GSA**, et la fonte grise à graphite lamellaire **Ft25**, qui ont été prélevées à partir des éprouvettes cylindriques d'environ 200 mm de longueur et 20 mm de diamètre. L'élaboration de toutes ces fontes proviennent de l'unité fonderie de Rouiba (UFR) à Alger.

Les matériaux utilisés ont été coulés dans des Keel-blacks puis refroidies dans un système à air.

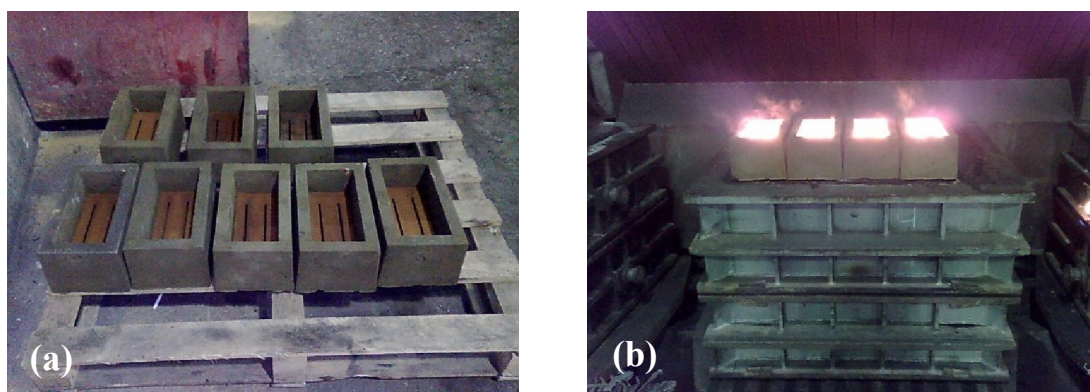


Figure-22: Les keel-blacks avant la coulée (a) et après la coulée (b).

Les opérations de découpage des pièces et d'usinage pour obtenir des échantillons pour les différentes analyses telles que : les traitements thermiques et les essais ont été effectuées par la scie mécanique. Pour l'usinage des éprouvettes de traction on a utilisé la machine de tournage de l'UFR.

2. COMPOSITION CHIMIQUE

Avant d'entamer notre étude, nous avons déterminé la composition chimique des trois nuances de fonte à étudier.

L'opération de l'analyse spectrale a été réalisée à l'URASM (Unité de la Recherche Appliquée Spécialité Métallurgie) d'Annaba.

L'analyse a été réalisée par spectrométrie en infra rouge pour le C et le S, et les autres éléments par spectrométrie de fluorescence aux rayons X. Les compositions chimiques de la fonte GSC, GSA et la Ft25 sont données respectivement dans le **tableau-7** au chapitre III.

2.1. La spectrométrie en infra rouge

La spectrométrie en infra rouge est un appareil commandé par microprocesseur qui mesure la teneur en carbone et en soufre d'un métal, d'un minerai, d'une céramique et d'une fonte. Cet appareil est composé de trois sous systèmes (voir la **Figure-23**) :

- L'unité de mesure et les circuits électriques ;
- Le four à induction ;
- La console de commande.

Le principe de fonctionnement de la spectrométrie en infra rouge est décrit comme suit :

- La fusion des copeaux du métal dans un four à induction ;
- La récupération des gaz CO et SO₂, dans la console de commande ;
- Transformation du volume des gaz récupérés en pourcentage massique à l'aide de l'unité de mesure.



Figure-23: L'appareil de la spectrométrie en infra rouge.

2.2. La spectrométrie de fluorescence aux rayons X

La spectrométrie de fluorescence X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour *X-ray fluorescence*) est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence des rayons X.

Lorsque l'on bombarde une matière avec des rayons X, cette dernière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres de rayons X ; c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X.

Le spectre des rayons X émis par la matière, est caractéristique de la composition de l'échantillon ; en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments données par le logiciel.



Figure-24: L'appareil de la spectrométrie de fluorescence aux rayons X.

3. LES TRAITEMENTS THERMIQUES EFFECTUÉS

3.1. Traitement thermique des échantillons

Pour chaque type de fonte (GSC, GSA et Ft25), il a été effectué plusieurs trempes dans l'eau, en fonction de la température, qui à chaque fois était augmentée de 20°C, dans l'intervalle [680 - 920]°C, sur des échantillons de forme cylindrique dont le diamètre de 20mm et d'épaisseur de 15mm. Les opérations effectuées sont les suivantes:

- chauffage ;
- maintien pendant 2 heures ;
- hypertrempe dans l'eau.

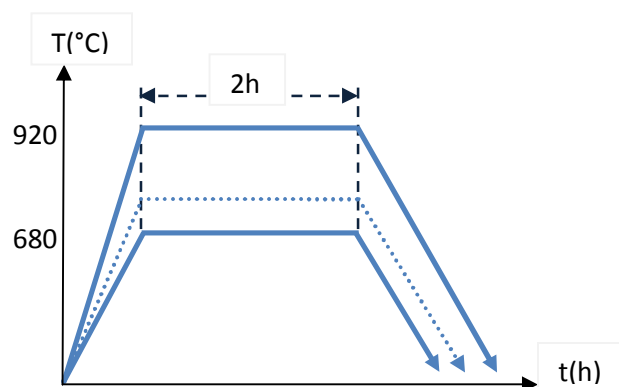


Figure-25: Traitement thermique de la trempe dans l'eau.

3.2. Traitement thermique des éprouvettes

Pour chaque type de fonte (GSC, GSA et Ft25), il a été effectué plusieurs trempes dans l'huile, suivies des revenus à une température de 380°C, sur des éprouvettes de forme cylindriques (voir les dimensions dans la **Figure-26**), les opérations effectuées sont les suivantes :

- chauffage ;
- maintien pendant 2 heures ;
- trempe dans l'huile ;
- revenu à 380°C pendant 2 heures ;
- refroidissement dans l'air.

Selon l'intervalle de la bande triphasée pour les trois types de fontes, on a choisi deux températures différentes, l'une dans le domaine austénitique et l'autre dans la bande triphasée. Le **tableau-4** nous donne les différentes températures des traitements effectués.

Tableau-4 : Les températures des traitements thermiques utilisées.

Type de fonte	Températures	
	Bande triphasée (BT)	Domaine austénitique (γ)
GSC	865°C	910°C
GSA	865°C	910°C
Ft25	800°C	850°C

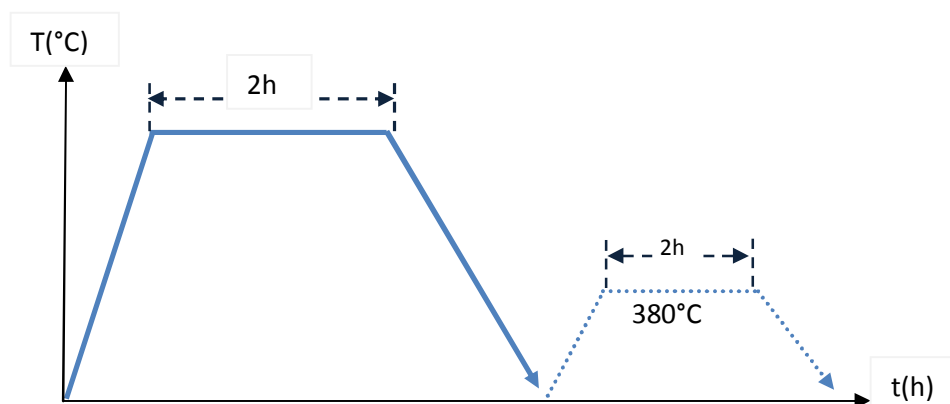


Figure-26: Traitement thermique de la trempe dans l'huile suivi d'un revenu.

4. CARACTERISATION

La caractérisation se compose de deux parties distinctes : l'une microstructurale où l'on met en évidence les différentes phases et couches qui apparaissent qualitativement et quantitativement, l'autre est mécanique où on procédera à deux essais : la traction et la dureté.

Cette caractérisation consiste à évaluer les propriétés mécaniques suivantes : la résistance à la traction, l'allongement et la dureté.

4.1. Caractérisation microstructurale

4.1.1. Préparation des échantillons

Afin de caractériser la structure de la fonte élaborée, ainsi que la morphologie du graphite obtenu, on procède à l'examen micrographique, qui nécessite une préparation métallographique suivi d'une attaque chimique.

L'échantillon est découpé de façon à obtenir une surface d'examen plane. Le polissage se fait généralement en deux étapes :

- **Pré-polissage :**

Il se fait par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fine, décroissante (240, 400, 600 et 1000). L'opération de polissage s'effectue habituellement avec lubrification à l'aide de l'eau (arrosage) et ceci pour éliminer le risque d'échauffement de l'échantillon. Ce dernier est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible granulométrie.

- **Polissage de finition :**

Le polissage de finition consiste à polir l'échantillon sur un disque de feutre avec la suspension de la pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur le disque qui joue aussi le rôle d'un refroidisseur.

4.1.2. Attaque chimique

La révélation de la microstructure est réalisée à l'aide d'une attaque chimique qui met en évidence les différentes phases de la fonte étudiée. Pour cela les échantillons sont attaqués au Nital : 5% d'acide nitrique (HNO_3) et 95% d'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-OH}$). La durée de l'attaque chimique est comprise entre 20 et 30 secondes.

Avant l'attaque chimique, nous avons vérifié au microscope optique que les échantillons ne possèdent aucune rayure pour pouvoir finalement accéder à l'attaque chimique.

4.1.3. Observation microscopique

a) Microscopie Optique

Comme son nom l'indique, le microscope est un instrument permettant l'observation visuelle de petits objets ou détails d'objets, usuellement indiscernables à l'œil nu. Une des propriétés de cet appareil est son agrandissement angulaire, c'est-à-dire la possibilité de fournir une image agrandie d'un objet à étudier.

Cependant, ce paramètre ne suffit pas à lui seul à caractériser les performances du dispositif. Il faut en effet que cette propriété s'applique à tous les détails de l'objet, y compris les plus fins. La seconde propriété du microscope est donc sa résolution, dont découlent d'importantes conséquences pratiques, puisque cela implique de travailler avec des optiques de grande ouverture numérique, mais limitée par la diffraction. Les bons microscopes sont donc des systèmes optiques et mécaniques complexes et coûteux [8].

- Principe de fonctionnement :

Le microscope est constitué (**Figure-27**) :

- D'un objectif et d'un oculaire. Pour le moment, ils sont représentés par deux lentilles minces convergentes pour simplifier la compréhension. L'objectif et l'oculaire sont en réalité des systèmes épais composés de plusieurs lentilles, afin de limiter les aberrations.

- De deux diaphragmes DO et DC, respectivement diaphragme d'ouverture et diaphragme de champ de l'oculaire.

L'objectif donne de l'objet AB une image (intermédiaire) réelle et agrandie $A'B'$. On place ensuite l'oculaire de telle sorte que l'image intermédiaire se trouve exactement à la position de son foyer objet $Fo2$. Dans cette configuration, l'image reprise par l'oculaire donne une image virtuelle à l'infini, observable par l'œil nu. Le grossissement global du microscope est donc le produit du grossissement de l'oculaire par l'agrandissement de l'objectif.

Pour assurer un agrandissement suffisant tout en limitant l'encombrement du microscope, l'objectif doit être de distance focale aussi courte que possible et l'objet AB placé très près en avant du foyer objet $Fo1$.

- Diaphragmes et pupilles :

La pupille de sortie de l'objectif est matérialisée par un diaphragme d'ouverture DO, se situant dans le plan focal image $Fi1$ de l'objectif.

Ce diaphragme contrôle le flux de lumière entrant et représente donc l'ouverture numérique du système. La pupille de sortie du microscope est l'image par l'oculaire de la pupille de sortie de l'objectif. Ainsi, le plan focal image $Fi2$ du microscope est confondu avec le plan de sa pupille de sortie.

Cette pupille est l'anneau oculaire du microscope où l'observateur place son œil [8].

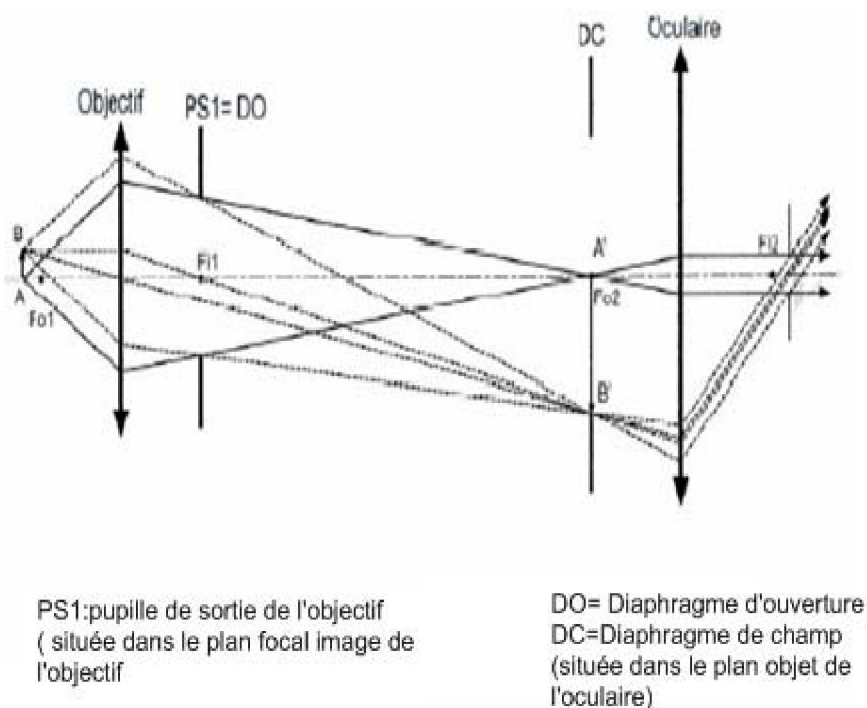


Figure-27: Schéma de principe du microscope sur l'aspect optique [8].

A l'aide d'un microscope optique (**Figure-28**) nous avons pris les microstructures. Les photos sont prises par une caméra numérique reliée à l'ordinateur. Le logiciel d'acquisition des photos est l'**Archimed**. Les résultats de cette étape sont présentés dans le chapitre III.

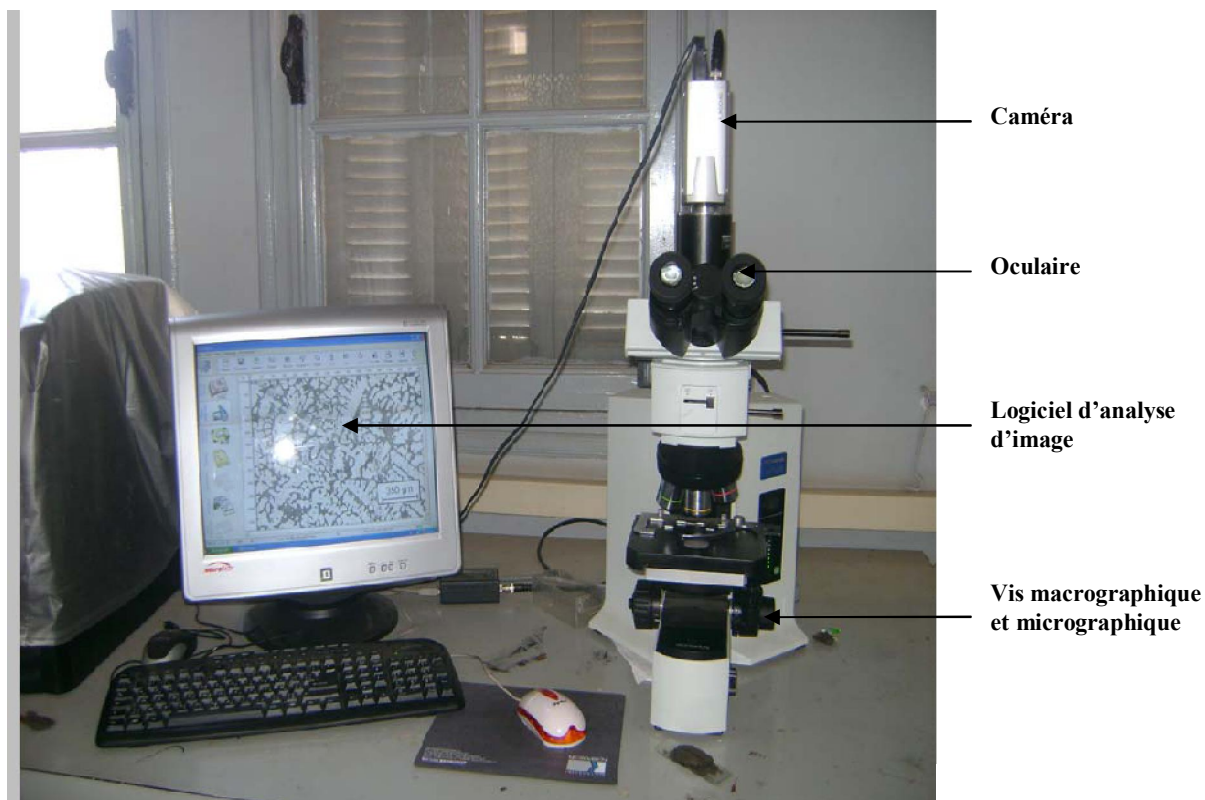


Figure-28: Microscope optique « OLYMPUS » du Département Métallurgie.

b) Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Les principes de fonctionnement et de formation de l'image en microscopie électronique à balayage (MEB), sont entièrement différents de ceux du microscope optique. Pour les comprendre il faut nécessairement connaître les différents phénomènes qui se produisent quand un objet est bombardé par un faisceau d'électrons. Bombarder par un faisceau d'électrons un point sur une surface réémet plusieurs signaux caractéristiques dont les principaux sont :

-Des électrons rétrodiffusées e_r qui proviennent d'interactions élastiques entre les électrons incidents et les atomes sous la surface ; leur énergie est voisine de celle des électrons incidents, e_0 , et ils sont engendrés jusqu'à une profondeur de l'ordre de $1 \mu\text{m}$ sous la surface. L'intensité de l'émission des électrons rétrodiffusés est fonction de l'orientation de la surface par rapport au faisceau incident et du numéro atomique des éléments qui la composent.

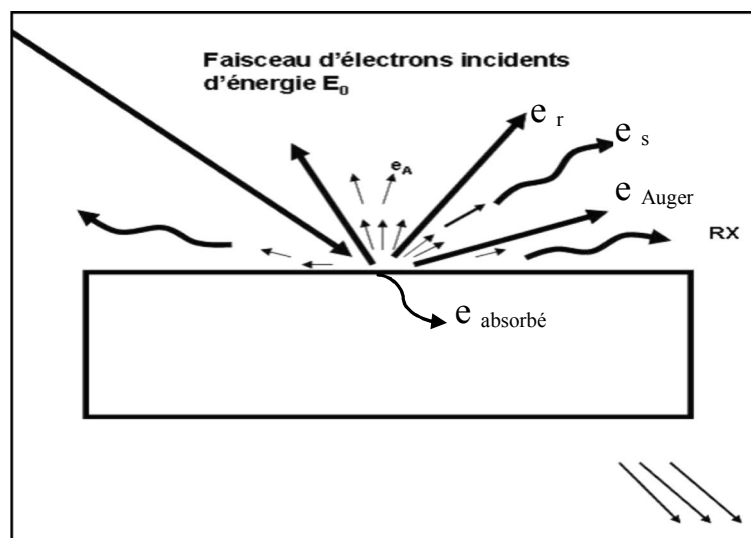


Figure-29: représentation schématique de l'interaction entre un faisceau d'électrons et la surface d'un échantillon.

-Des électrons secondaires e_s , produits par des chocs inélastiques entre les électrons incidents et les atomes de l'échantillon ; leur énergie est inférieure à 50 eV, et ils proviennent d'une zone située à moins de $0,1\mu\text{m}$ de la surface ; l'intensité des électrons secondaires est principalement fonction de l'orientation de la surface ;

-Des rayons X, dont la distribution spectrale dépend des éléments présents sous la surface. Tout comme les électrons rétrodiffusés, les rayons X proviennent d'une zone de quelques micromètres d'épaisseur.

-Des électrons Auger créés par l'interaction des électrons incidents et des électrons des sous-couches électroniques des atomes. La distribution spectrale des électrons Auger est fonction des éléments qui composent la surface ; ils proviennent des toutes premières couches atomiques de la surface (à moins de 1nm) et sont utilisés pour faire des analyses chimiques superficielles (spectroscopie Auger) ;

Dans un MEB, un faisceau d'électrons, d'un diamètre inférieur à 10 nm , est focalisé sur l'échantillon à l'aide de lentilles électromagnétiques. L'intensité des électrons réémis par la surface dépend de l'orientation et de la composition de celle-ci. Les électrons réémis (rétrodiffusés ou secondaires) sont captés par un détecteur d'électrons, et le signal électrique ainsi obtenu est amplifié et sert à moduler l'intensité du faisceau d'électrons d'un écran cathodique. Des bobines de balayage permettent au faisceau incident de couvrir ligne par ligne la surface à étudier. Le faisceau d'électrons de l'écran cathodique se déplace de façon synchrone, ligne par ligne ; à chaque position du faisceau incident sur l'échantillon correspond une position du spot sur l'écran cathodique.

On obtient ainsi sur l'écran cathodique une image reconstituée de l'échantillon à partir des signaux fournis par chaque point de la surface.

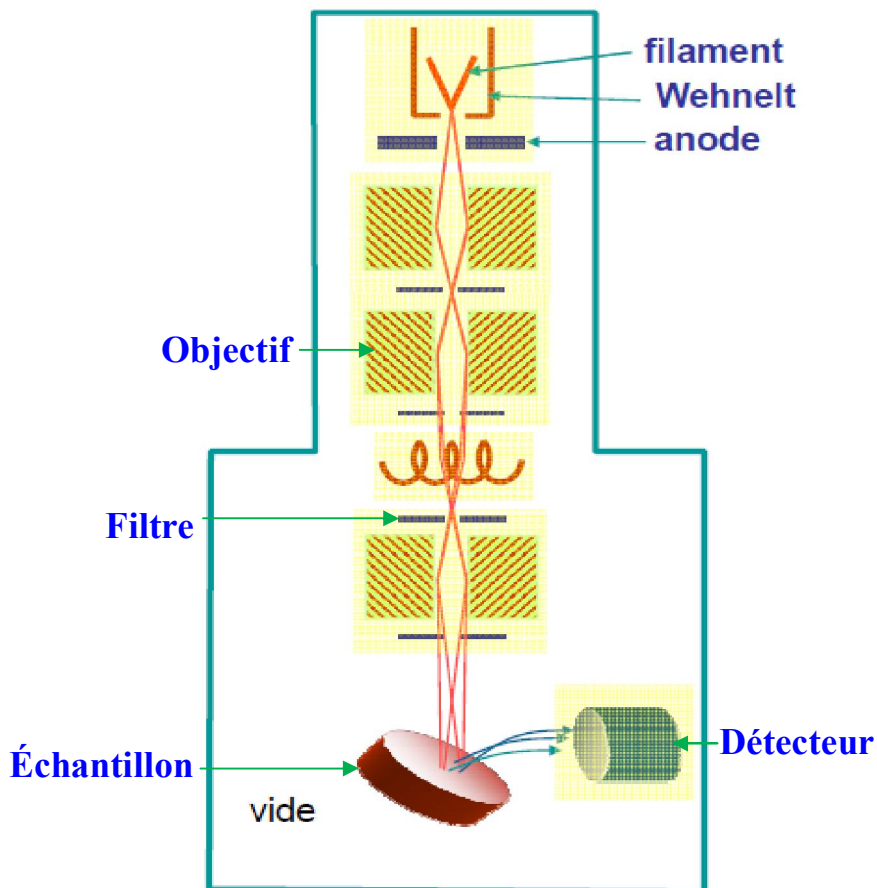


Figure-30: Représentation schématique d'un microscope électronique à balayage.

4.2. Caractérisation mécanique

4.2.1. Essai de dureté

L'essai de dureté Brinell consiste à appliquer sur la surface polie d'une charge constante et statique F pendant un temps défini (10 à 15 s). Cette charge s'applique à l'aide d'une bille de diamètre D , nous permettons de mesurer le diamètre de l'empreinte laissée après suppression de la charge.

La dureté Brinell (HB) est le quotient de la charge F en Kg (ou $1,02F$ en daN) par la surface S en mm^2 de l'empreinte considérée comme la calotte d'une sphère de diamètre d [23].

$$HB = F / S \quad (F \text{ en Kgf})$$

$$HB = 1.02 F / S \quad (F \text{ en daN})$$

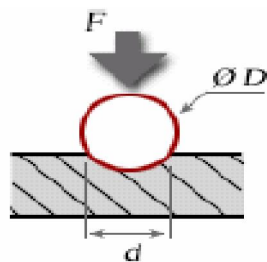


Figure-31: Essai de dureté Brinell HB.

On a effectué des essais de dureté Brinell à l'UFR pour voir l'évolution de la dureté en fonction du traitement thermique de la trempe. Les essais ont été effectués à l'aide d'une machine WOLPERT (**Figure-32**) ayant les propriétés suivantes :

- la charge : 3000 kgf ;
- diamètre de la bille : 10 mm ;
- le temps de l'essai : 30 s



Figure-32: La machine de dureté HB.

4.2.2. Essai de traction

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de cette dernière. Cet essai est réalisé à l'URASM à l'aide d'une machine de traction SATEC (60HVL-1248). Elle permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau.

Dans notre expérience, il a été utilisé des éprouvettes qui ont une forme de barreau de diamètre D_0 et de longueur L_0 , et qui sont représentées dans la figure **Figure-33** ci-dessous.

Les éprouvettes ont été usinées selon les normes suivantes :

- pour les fontes GS : norme AFNOR NF A32-201 ;
- pour les fontes GL : norme AFNOR NF A32-101.

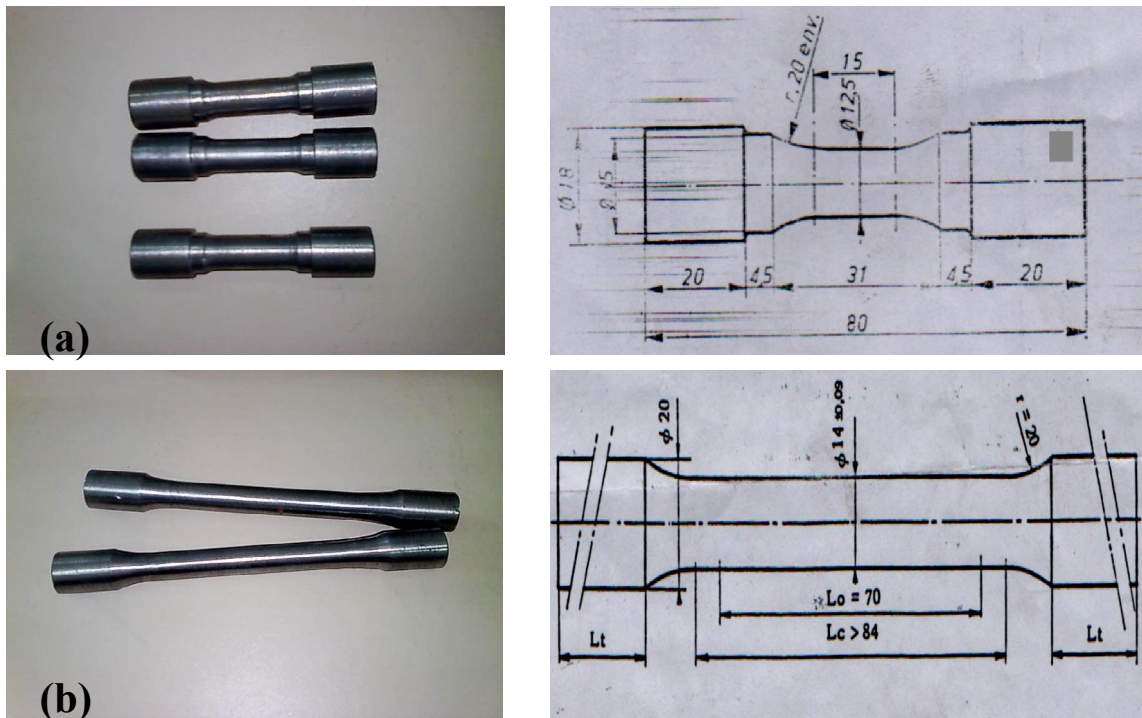


Figure-33: Les éprouvettes de traction pour les fontes GL (a), et les fontes GS (b).

Le diagramme de traction conventionnel est représenté sur la **Figure-34** :

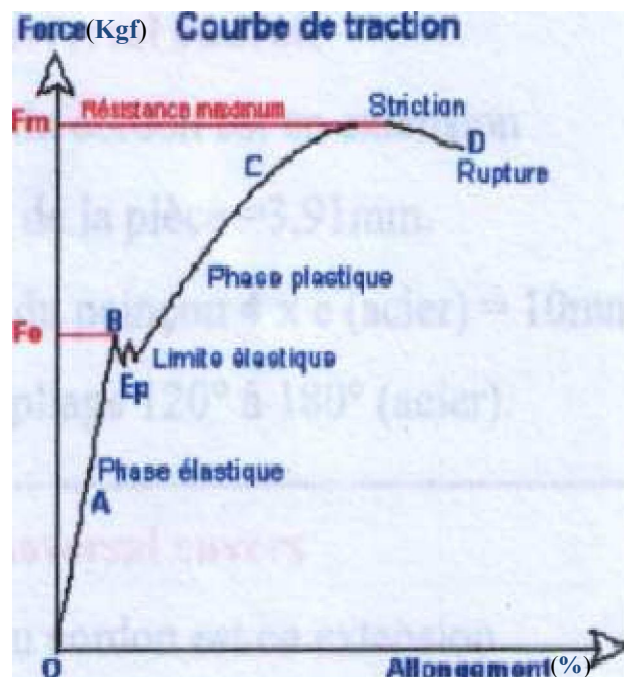


Figure-34: Courbe conventionnelle de traction.

Les différents domaines de la courbe de traction sont :

- OB : la phase élastique.
- BC : la phase plastique.
- L'intervalle [Fm – D] : la phase de striction.
- D : point de rupture.

Les caractéristiques mécaniques de la traction sont représentées dans le **tableau-5**, ci-dessous:

Tableau-5: *Caractéristiques mécaniques de la traction.*

Caractéristiques de traction	Formules de calculs
Limite élastique apparente Re	$Re \text{ (N/mm}^2\text{)} = Fe \text{ (MPa ou N) / } So \text{ (mm).}$
Résistance à la rupture Rm	$Rm \text{ (N/mm}^2\text{)} = Fm \text{ (MPa ou N) / } So \text{ (mm).}$
Allongement en % : A %	$A [(Lu - Lo) / Lo] \times 100.$
Striction en % : Z %	$Z [(So - Su) / So] \times 100.$

Il existe une autre représentation de la courbe de traction de plus en plus utilisée au laboratoire qui consiste de reporter la contrainte vraie (δ) en fonction de la déformation rationnelle de traction (ε). L'allure de telle courbe est représentée sur la **Figure-35**.

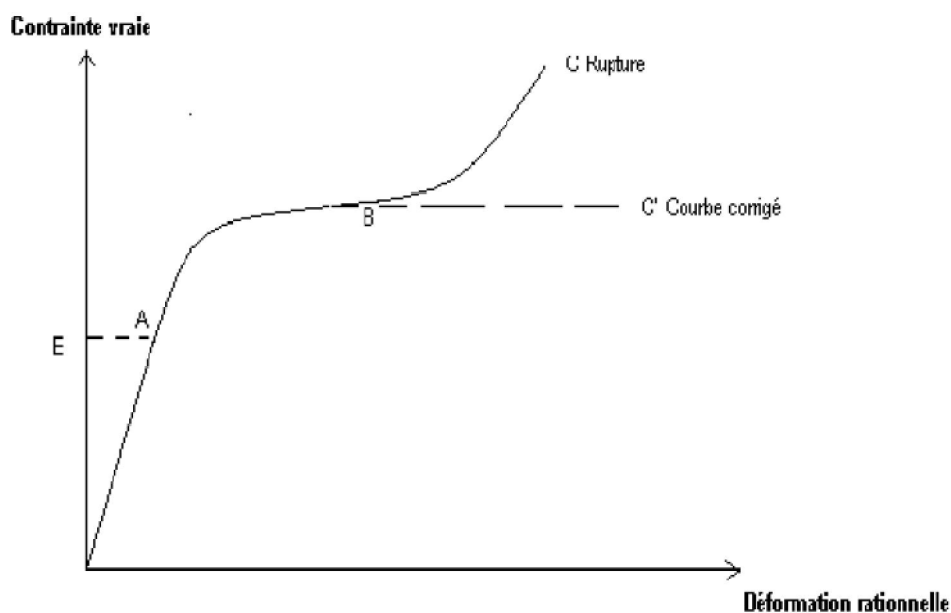


Figure-35: *Courbe rationnelle de traction.*

Avec :

- $\delta_{\text{vraie}} = F (A+1)$
- $\varepsilon = \ln (A+1)$

F : la force de traction ; A : l'allongement.

5. ANALYSE QUANTITATIVE

Dans le but de quantifier le nombre de nodules du graphite présents dans le métal à l'état brut de coulée et après traitement thermique dans le domaine de la bande triphasée, il a été utilisé la méthode de grillage qui consiste en une grille à plusieurs carreaux d'arête $a = 5 \text{ mm}$ (dessiner par Microsoft Word, voir la **Figure-36**), superposée sur la photo microscopique, sachant que les dimensions de cette grille sont pareilles à celles de la photo [8].

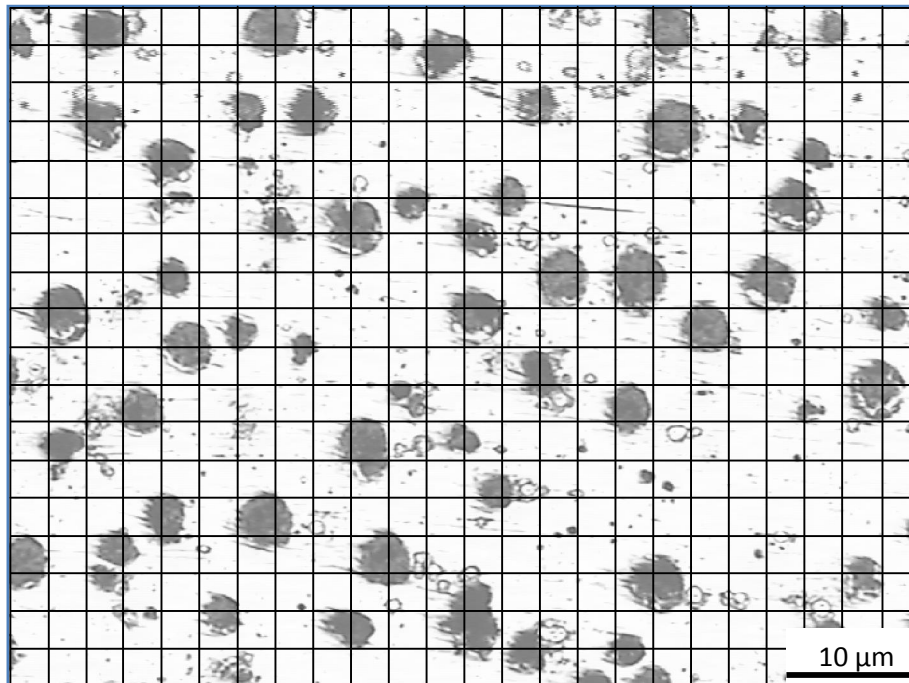


Figure-36: La méthode de grillage d'analyse quantitative des structures métallographiques.

Le nombre total de nœuds de la grille est égale : $24 \times 18 = 432$ nœuds

Le taux du graphite $\tau(\%)$ est fonction du nombre de nodules apparents existant dans les nœuds, divisé par le nombre total des nœuds dans la grille :

$$\tau(\%) = \frac{\text{Nombre de nodules existants dans les nœuds}}{\text{Nombres total de nœuds dans la grille}} \times 100$$

Pour que notre résultat soit exhaustif et représentatif, l'opération en question doit être réalisée sur un certain nombre de photos, voire sur plusieurs pages, suite à quoi la moyenne est calculée.

CHAPITRE-III : **RÉSULTATS & INTERPRÉTATIONS**

1. DESCRIPTION DES FONTES A L'ÉTAT BRUT DE COULÉE

1.1. La composition chimique

Le **tableau-6** nous donne les intervalles des teneurs massiques pour les éléments chimiques : C, Si, Mn, S, P, Cu et le Carbone équivalent. Ces fourchettes sont utilisées à l'UFR pour l'élaboration des fontes Ft25, GSC et la GSA.

Tableau-6: Les fourchettes de la composition chimique de l'UFR.

Nuance	% Carbone	% Silicium	% Manganèse	% Soufre	% Phosphore	% Cuivre	% C équivalent
Ft25	3,16 à 3,36	1,60 à 1,90	0,60 à 0,90	≤ 0,10	≤ 0,15	0,5 à 0,8	3,70 à 4,00
GSC	3,50 à 4,00	2,50 à 3,00	≤ 0,30	≤ 0,02	≤ 0,06	≤ 0,20	4,30 à 4,95
GSA	3,50 à 4,00	2,50 à 2,80	0,45 à 0,90	≤ 0,02	≤ 0,06	≤ 0,20	4,30 à 4,90

Le **tableau-7** nous donne les résultats de la composition chimique réelle de chaque nuance obtenue à l'URASM (Unité de la Recherche Appliquée Spécialité Métallurgie).

Tableau-7: Composition chimique des fontes étudiées.

La Fonte	Analyses Chimiques													
	Teneur des éléments en % massique													
	C	Mo	Mn	Cr	Cu	Ni	V	Co	Ti	P	Si	Al	As	S
Ft25	3,17	0,01 3	0,72 5	0,07 8	0,83 3	0,06 8	0,01 9	0,00 6	< 0,00 9	0,07 6	1,78 9	0,00 8	Traces	0,02 9
GSC	3,06	0,01 5	< 0,43	0,07 4	0,12 9	0,06 4	0,01 8	0,00 9	< 0,00 9	0,06 0	2,80 1	0,00 7	0,002 7	0,01 7
GSA	3,14	0,01 2	0,70 0	0,06 4	0,17 1	0,06 2	0,01 9	0,00 9	< 0,00 9	0,05 8	2,26 2	0,00 7	Traces	0,00 6

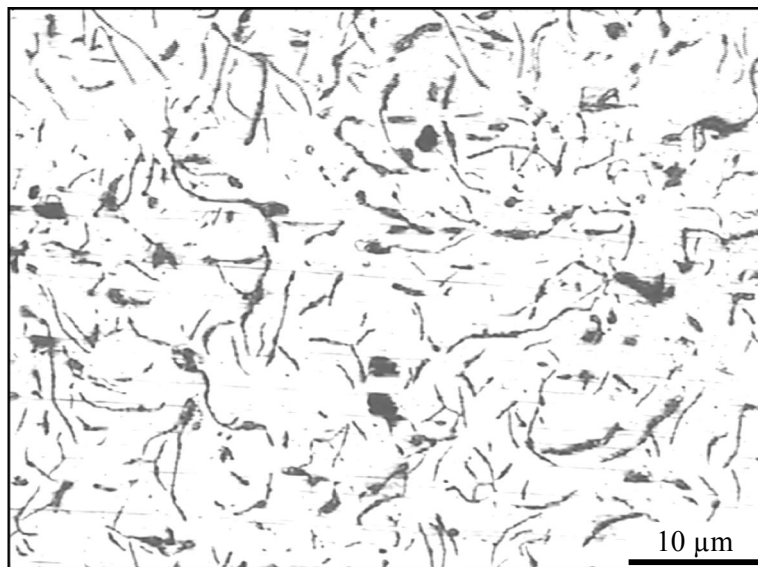
Le certificat officiel des analyses effectuées à l'URASM se trouve à l'Annexe I.

Les résultats de l'analyse spectrale sont compatibles avec les fourchettes de l'UFR, hormis la teneur en carbone pour les fontes GSC et GSA, et la teneur en silicium pour la fonte GSA.

1.2. La microstructure

a. La fonte Ft25

C'est une fonte à graphite lamellaire, la matrice est presque totalement perlitique (90% de perlite), la forme de la perlite est lamellaire. La distribution du graphite est uniforme et l'orientation est désordonnée (Type A), dont les dimensions varient entre 3 et 7 selon la norme ASTM et de taux $\tau(\%) = 19,67\%$.



F

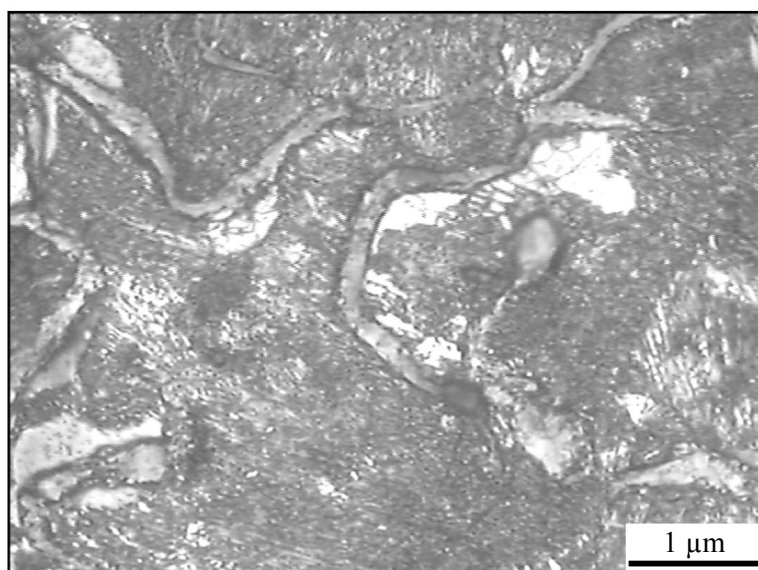


Figure-38: La fonte Ft25 à l'état brut avec l'attaque chimique.

b. La fonte GSC

C'est une fonte à graphite sphéroïdale, le graphite dont les dimensions varient entre 5 et 7 selon la norme ASTM et de taux $\tau(\%) = 17,82\%$. La matrice est ferrito-perlitique (75% de ferrite), la forme de la perlite est lamellaire.

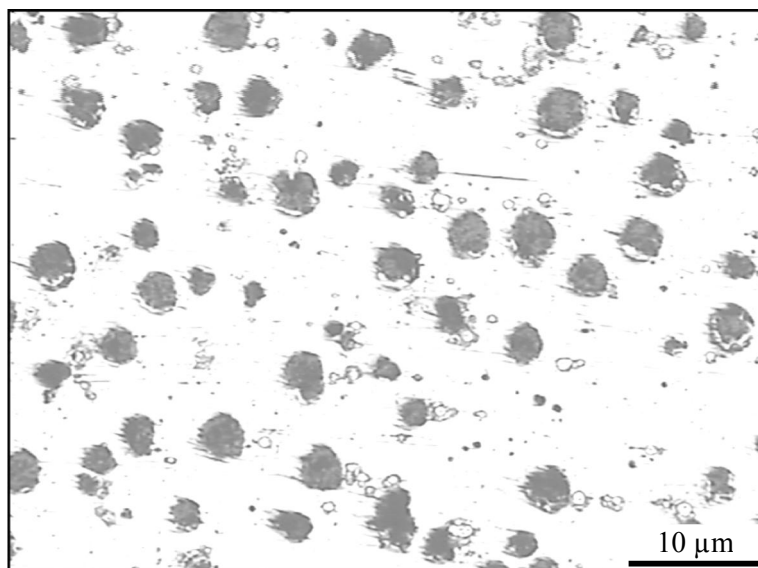
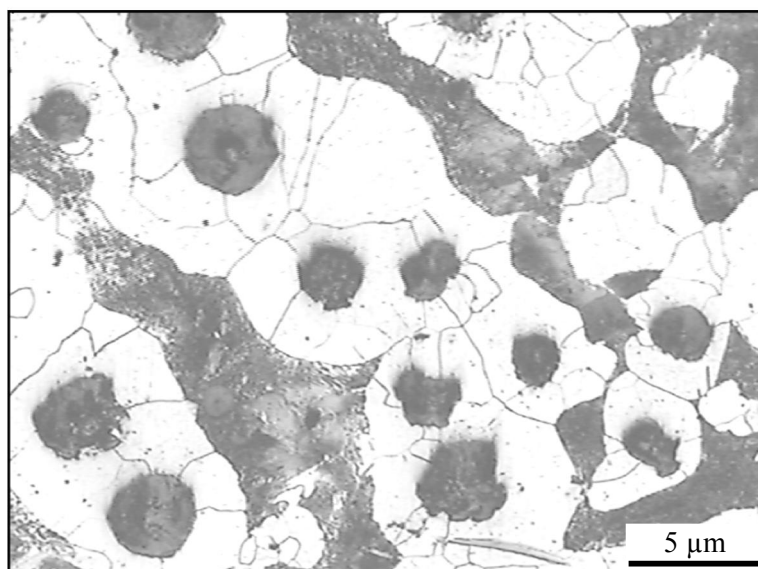
**F**

Figure-40: La fonte GSC à l'état brut avec l'attaque chimique.

c. La fonte GSA

C'est une fonte à graphite sphéroïdale, le graphite dont les dimensions varient entre 6 et 8 selon la norme ASTM et de taux $\tau(\%) = 17,47\%$. La matrice est ferrito-perlitique (70% de perlite), la forme de la perlite est lamellaire.

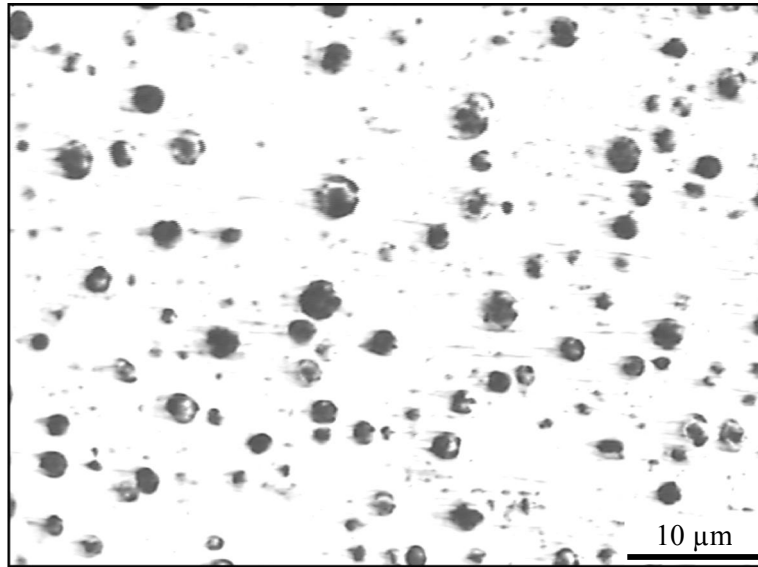
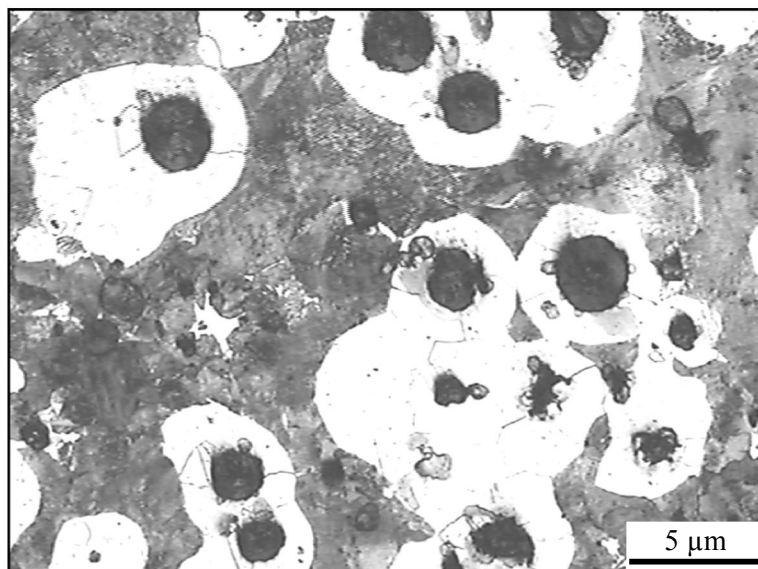
**F**

Figure-42: La fonte GSA à l'état brut avec l'attaque chimique.

1.3. Caractéristiques mécaniques

Le **tableau-8** nous donne les caractéristiques mécaniques des fontes Ft25, GSC et la GSA à l'état brut de coulée.

Tableau-8: caractéristiques mécaniques à l'état brut de coulée.

Nuance	Fourchette de la dureté 3000/10/30	La dureté mesurée	Résistance mécanique (Rm) N/mm ²	Allongement (A%)
Ft25	187-260 HB	200 HB	≥ 250	–
GSC	137-180 HB	195 HB	≥ 400	≥ 15
GSA	190-270 HB	222 HB	≥ 600	≥ 3

La fonte Ft25 est plus dure à cause de la teneur élevée en manganèse, en plus de la présence des lamelles de cémentite dans le constituant perlitique.

La fonte GSA est plus dure que la fonte GSC à cause de la différence de la teneur en manganèse, et la matrice de la GSA qui contient 60% de perlite.

2. DÉTERMINATION DE LA BANDE TRIPHASÉE PAR LA MÉTHODE DE TRAITEMENT THERMIQUE

2.1. Trempe à l'eau aux différentes températures

a. La fonte Ft25

Le **tableau-9** nous donne les valeurs de la dureté à chaque température de la trempe dans l'eau pour la fonte Ft25.

Tableau-9: les valeurs de la dureté de la fonte Ft25.

Température (°C)	680	700	720	740	760	780	800	820	840	860	880	900	920
Dureté (HB)	193	163	146	163	137	143	215	450	426	426	457	432	451

Les valeurs de la dureté sont représentées sous forme de courbe $HB = f(T)$ (**Figure-43**). La dureté est presque constante jusqu'à la température 770°C qui est la température A_{1min} . Cette dureté commence à augmenter jusqu'à la température 820°C qui est la température A_{1max} ; puis elle se stabilise.

L'intervalle de la température de la bande triphasée pour la fonte Ft25 est compris entre 770 et 820°C, la différence étant de 50°C.

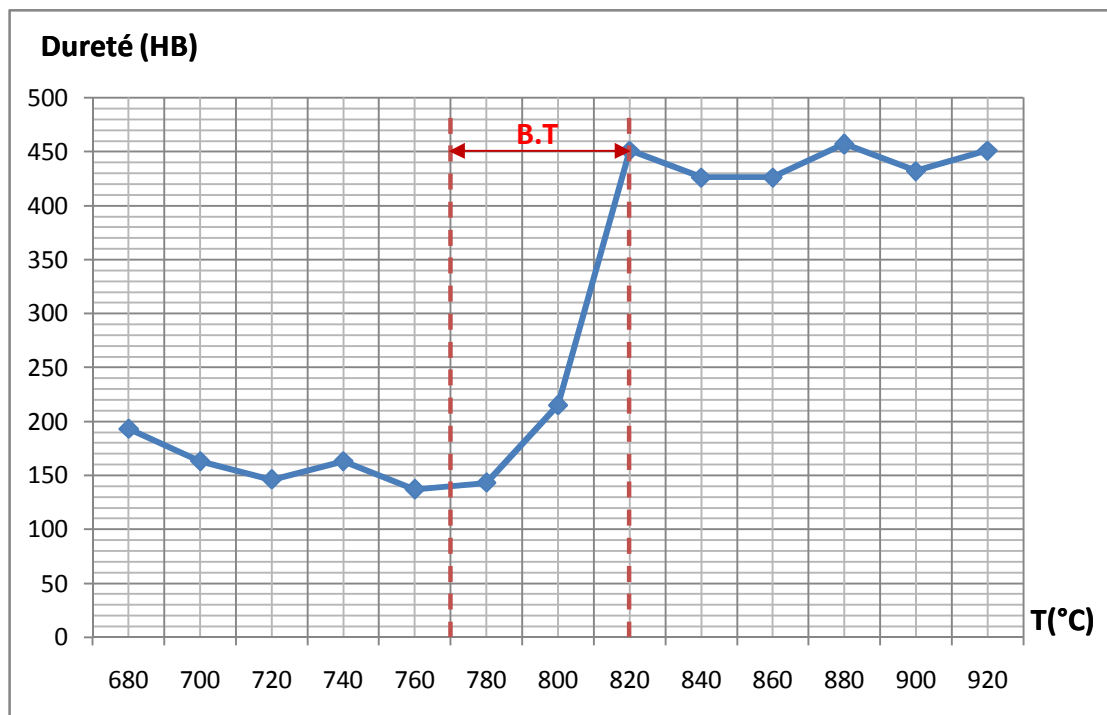


Figure-43: la variation de la dureté en fonction de la température de trempe de la fonte Ft25.

b. La fonte GSC

Le **tableau-10** nous donne les valeurs de la dureté à chaque température de la trempe dans l'eau pour la fonte GSC.

Tableau-10: les valeurs de la dureté de la fonte GSC.

Température (°C)	680	700	720	740	760	780	800	820	840	860	880	900	920
Dureté (HB)	213	207	200	200	195	207	207	209	217	282	438	538	552

Les valeurs de la dureté sont représentées sous forme de courbe $HB = f(T)$ (**Figure-44**). La dureté est presque constante jusqu'à la température 830°C qui est la température A_{1min} . Cette dureté commence à augmenter jusqu'à la température 900°C qui est la température A_{1max} ; puis elle se stabilise.

L'intervalle de la température de la bande triphasée pour la fonte GSC est compris entre 830 et 900°C, la différence étant de 70°C.

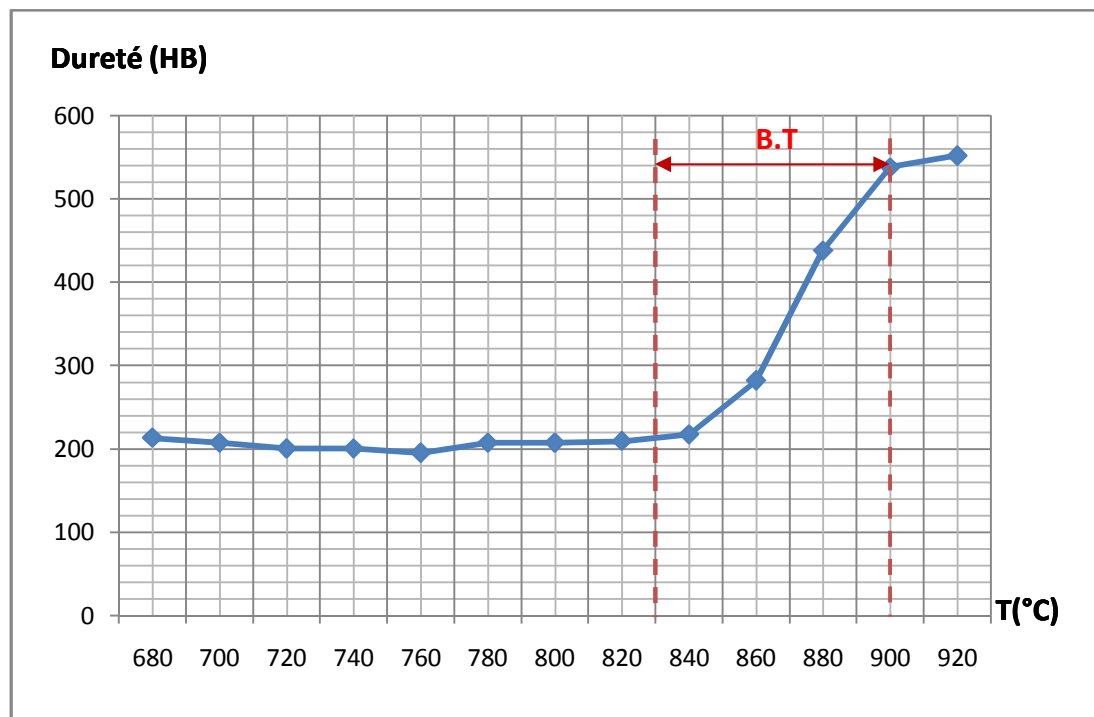


Figure-44: L'évolution de la dureté en fonction de la température de trempe de la fonte GSC.

c. La fonte GSA

Le **tableau-11** nous donne les valeurs de la dureté à chaque température de la trempe dans l'eau pour la fonte GSA.

Tableau-11: les valeurs de la dureté de la fonte GSA.

Température (°C)	680	700	720	740	760	780	800	820	840	860	880	900	920
Dureté (HB)	231	222	219	207	211	207	224	209	217	464	601	601	583

Les valeurs de la dureté sont représentées sous forme de courbe $HB = f(T)$ (**Figure-45**). La dureté est presque constante jusqu'à la température 830°C qui est la température A_{1min} . Cette dureté commence à augmenter jusqu'à la température 880°C qui est la température A_{1max} ; puis elle se stabilise.

L'intervalle de la température de la bande triphasée pour la fonte GSA est compris entre 830 et 880°C, la différence étant de 50°C.

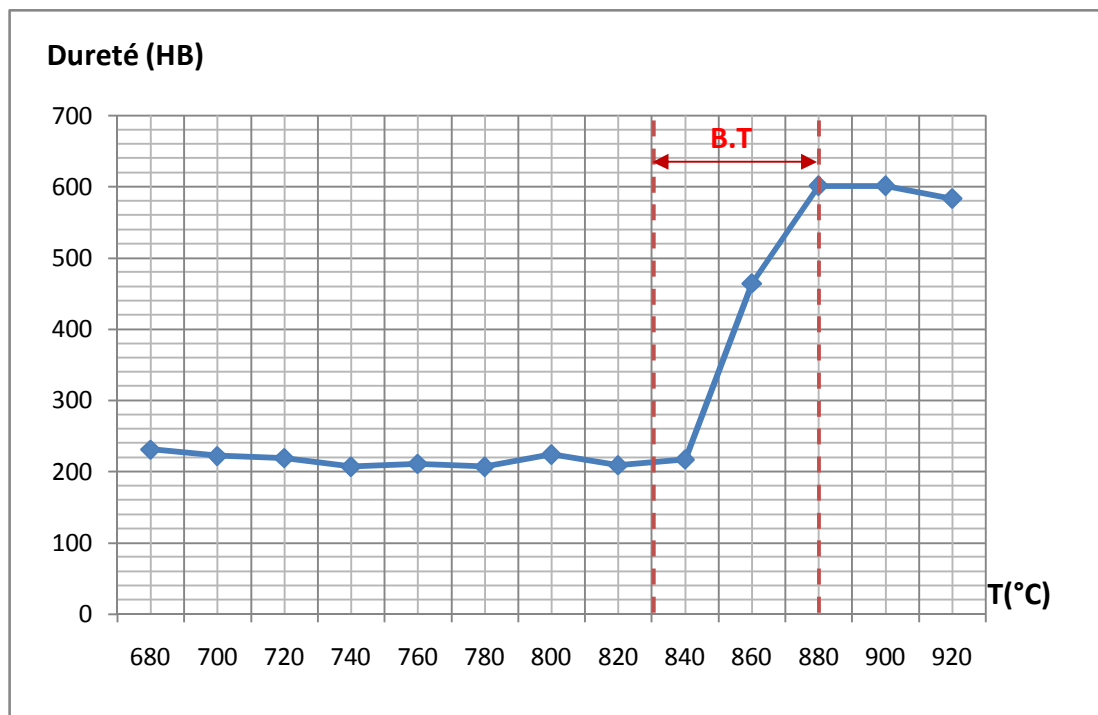


Figure-45: la variation de la dureté en fonction de la température de trempe de la fonte GSA.

❖ Etat récapitulatif

Le **tableau-12** nous résume les valeurs de la température A1min, la température A1max et la différence entre les deux températures pour chaque nuance.

Tableau-12: Récapitulatif des intervalles de la bande triphasée.

Fonte	A1min	A1max	La différence
Ft25	770°C	820°C	50°C
GSC	830°C	900°C	70°C
GSA	830°C	880°C	50°C

2.2. Étude métallographique

a. La fonte Ft25

Pour entamer l'étude métallographique, nous avons choisi trois températures respectives : 700°C, 780°C et 820°C (Pour les autres températures, les figures sont trouvées dans l'annexe II).

-La température 700°C mettant en évidence la perlite lamellaire en cours de décomposition en perlite globulaire (**Figure-46 et 47**). Le graphite est décheté, qui illustre l'effet de la diffusion du C libre, et qui entraîne une affectation thermique (**Figure-47**).

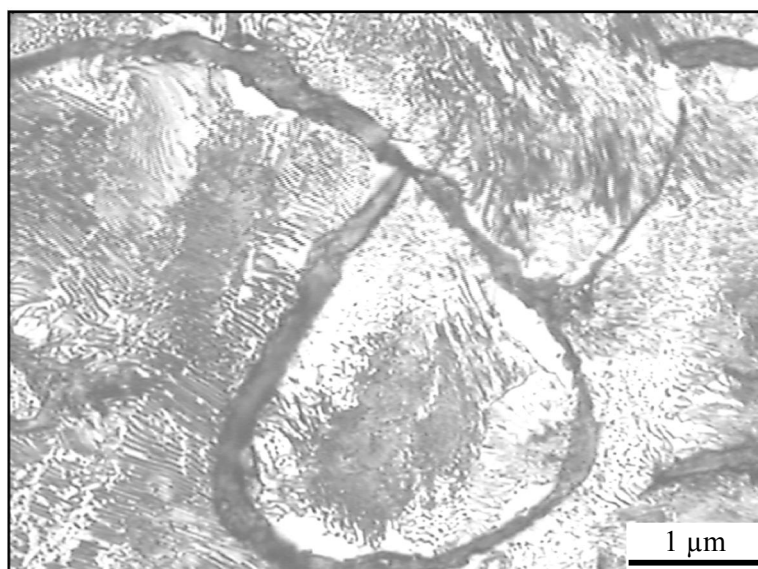
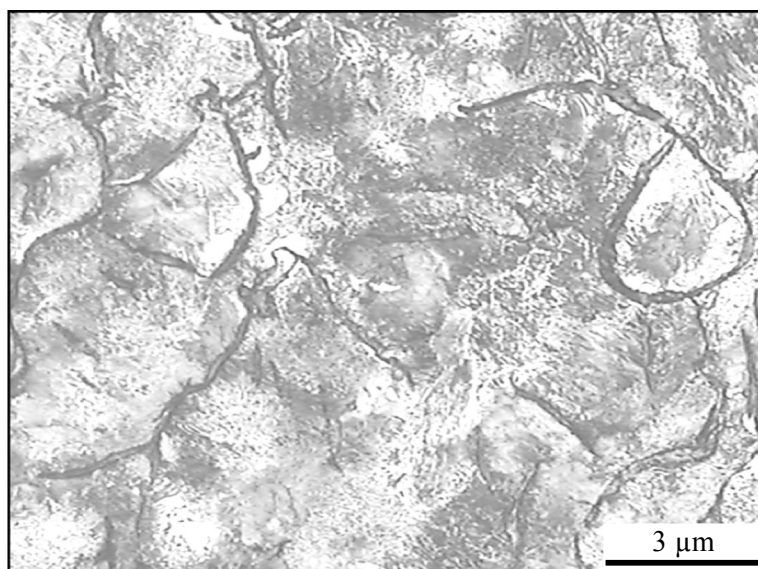


Figure-47: La fonte Ft25 à la température 700°C × 500.

-La température 780°C ; on constate que la dureté commence à augmenter 163 HB avec toujours un début de la transformation de la perlite en austénite (A1min), tout en gardant une transformation en cours de la perlite lamellaire en perlite globulaire (Figure-48 et 49).

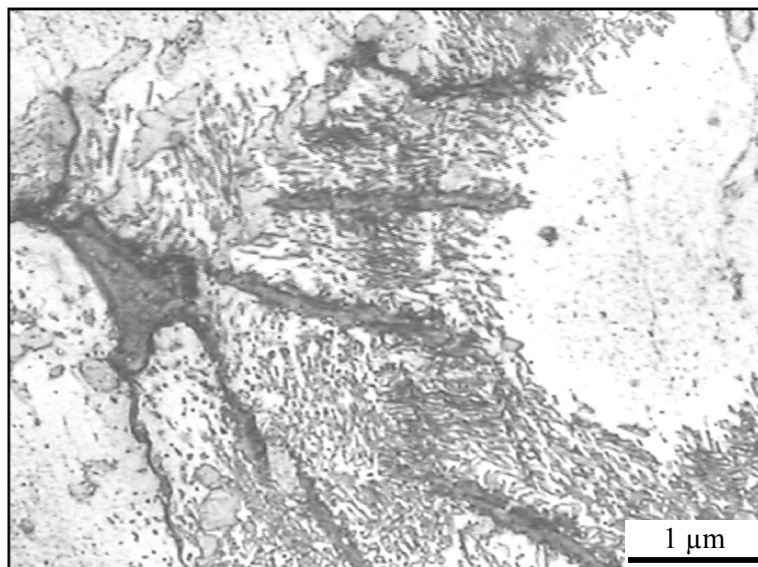


Figure-49: La fonte Ft25 à la température 780°C × 500.

-La température 820°C caractérise une généralisation de la transformation (**Figure-50 et 51**) qui se traduit par la dureté de 451 HB, cela nous permet de définir effectivement la température A_{1max} .

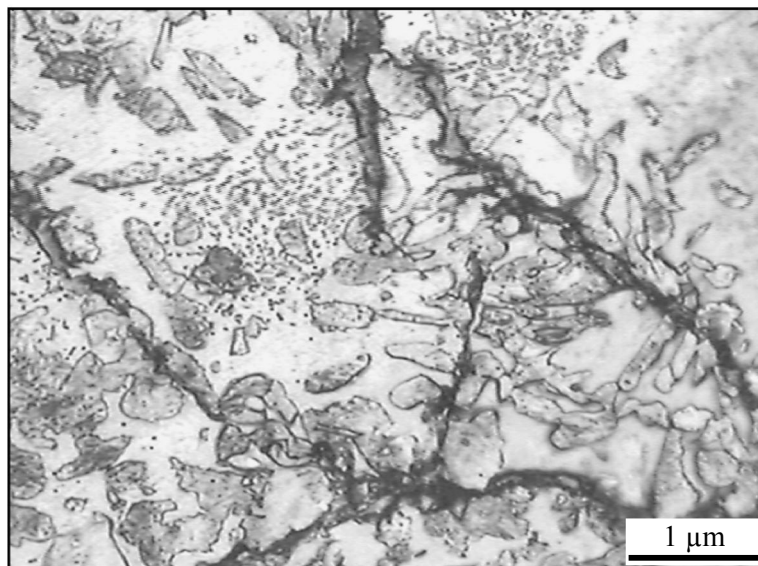
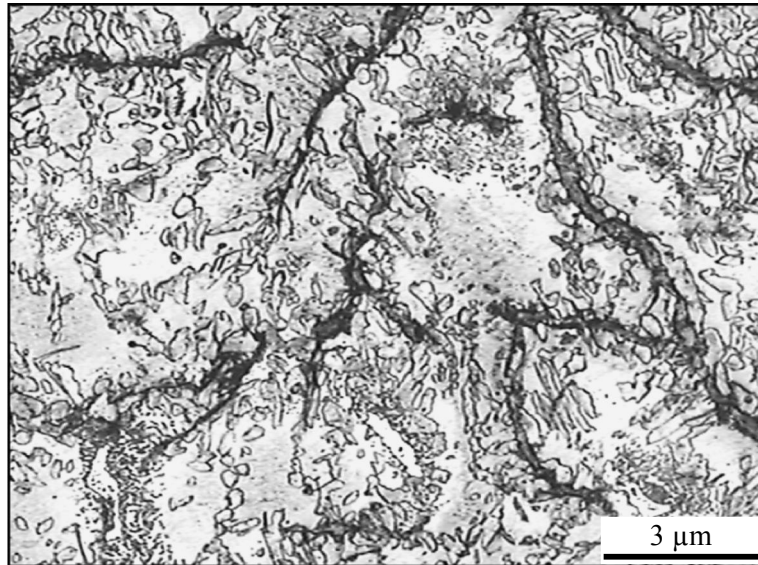


Figure-51: *La fonte Ft25 à la température 820°C × 500.*

b. La fonte GSC

Pour entamer l'étude métallographique, nous avons choisi trois températures respectives : 700°C, 840°C et 880°C (Pour les autres températures, les figures sont trouvées dans l'**annexe III**).

- La température 700°C mettant en évidence la perlite lamellaire en cours de décomposition en perlite globulaire (**Figure-52 et 53**). Le graphite est décheté, qui illustre l'effet de la diffusion du C libre, et qui entraîne une affectation thermique de la sphéroïdisation (**Figure-53**).

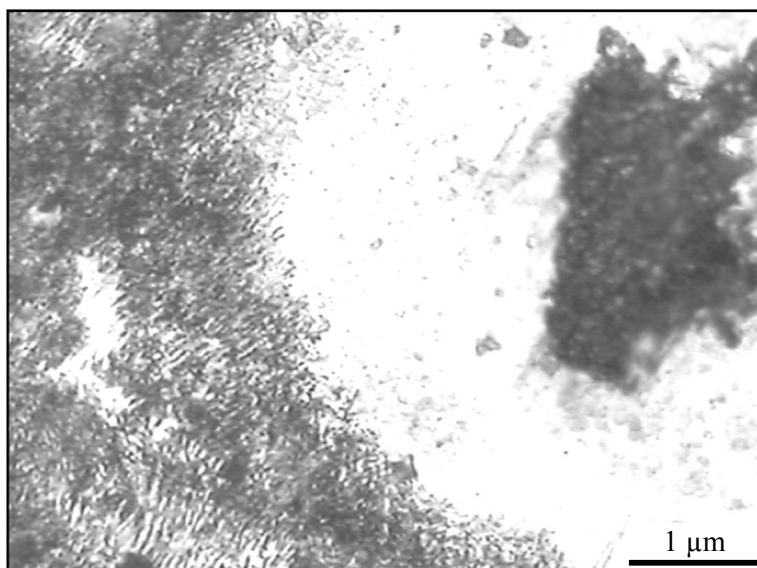
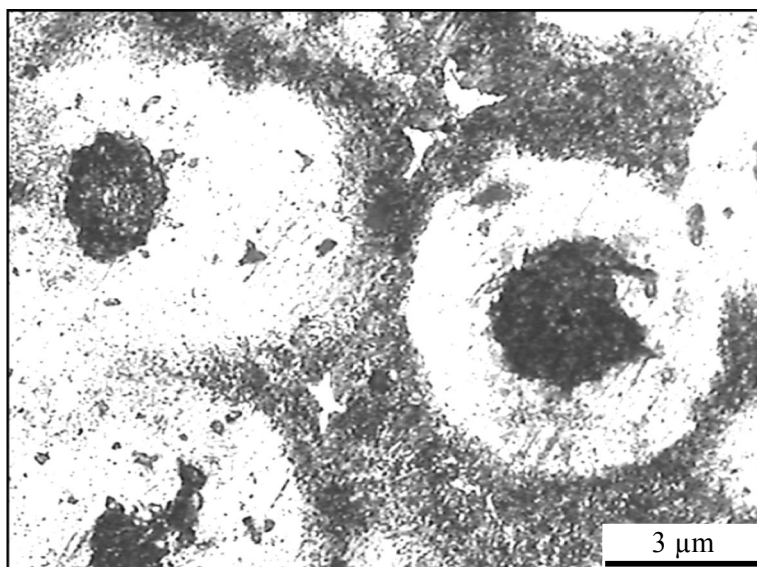
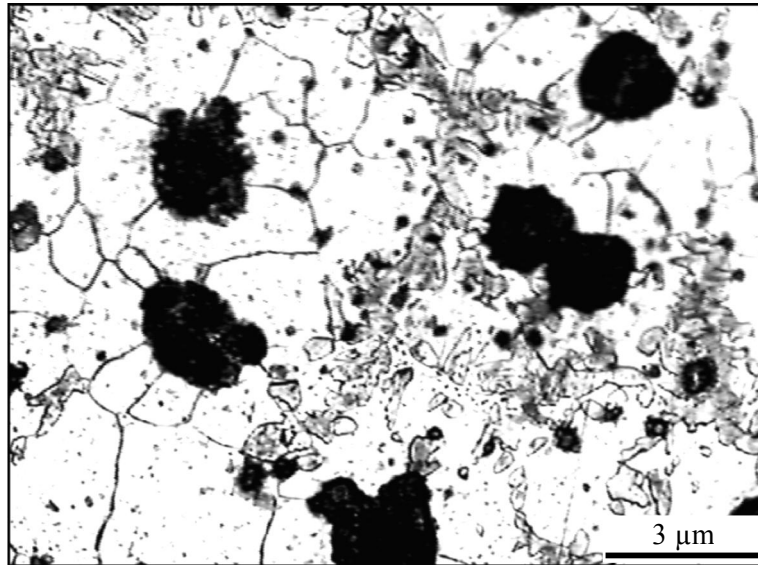


Figure-53: La fonte GSC à la température 700°C × 500.

- La température 840°C présente un début de la formation de la martensite dans la zone III du joint de cellule qui était riche en carbone et qui s'est transformé en premier lieu en austénite (γ) lors du chauffage (**Figure-54**).



La figure

est martensite.

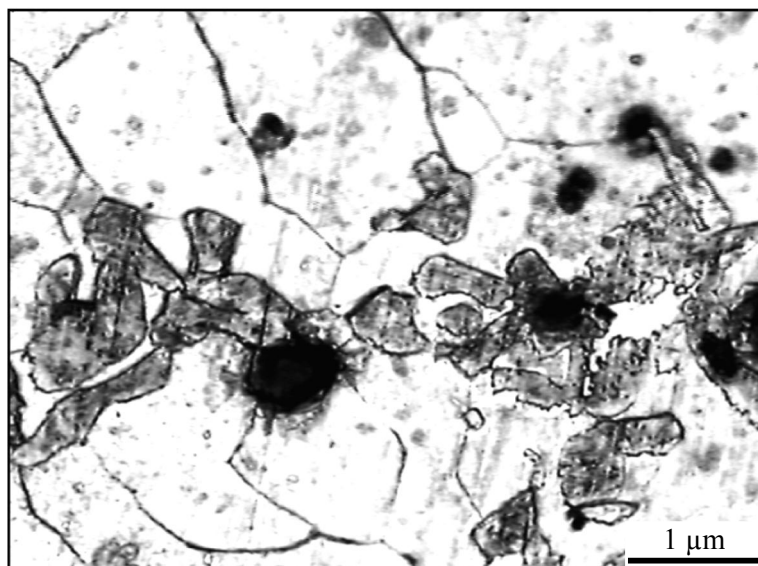
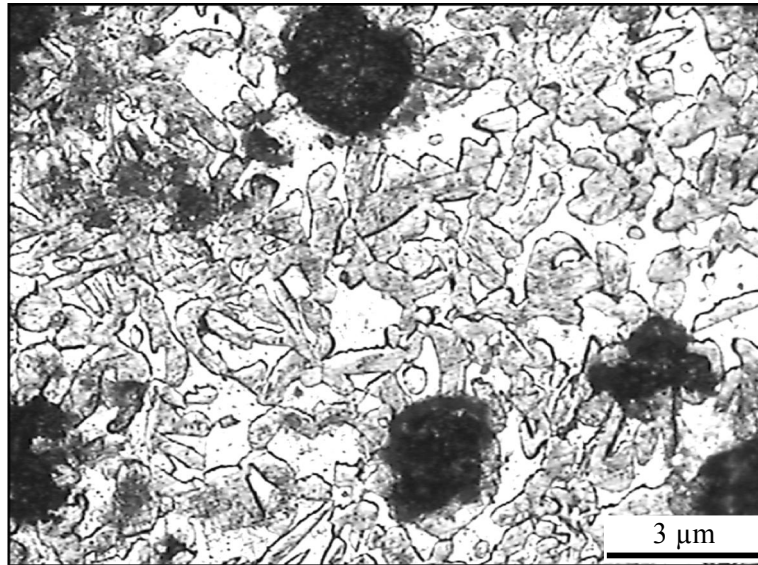


Figure-55: La fonte GSC à la température 840°C \times 500.

-La température 880°C permet de constater une généralisation de structure martensitique, qui caractérise la température limite expérimentale de la bande triphasée A_{1max} (**Figure-56**).



La figure-
l'austénite rés

rtensite et de

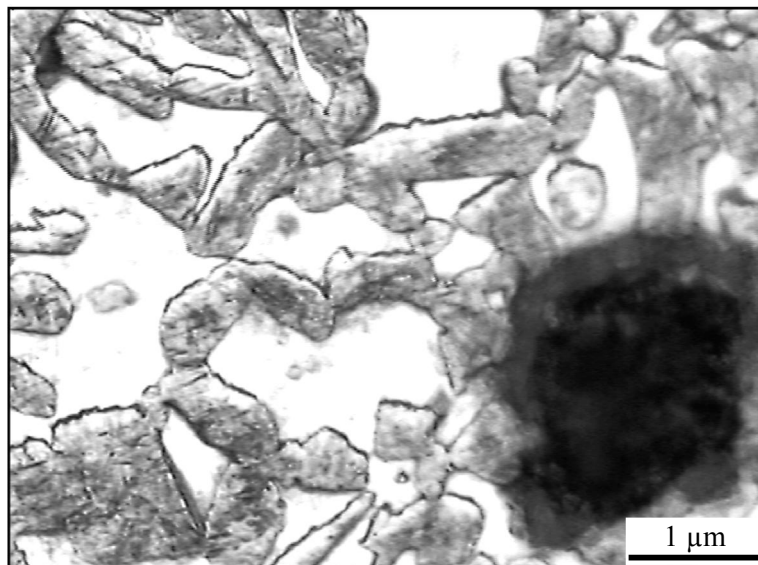


Figure-57: La fonte GSC à la température 880°C × 500.

c. La fonte GSA

Pour entamer l'étude métallographique, nous avons choisi quatre températures respectives : 700°C, 840°C, 860°C et 880°C (Pour les autres températures, les figures sont trouvées dans l'**annexe IV**).

-La température 700°C mettant en évidence la perlite lamellaire en cours de décomposition en perlite globulaire (**Figure-58 et 59**). Le graphite est décheté, qui illustre l'effet de la diffusion du C libre, et qui entraîne une affectation thermique de la sphéroïdisation (**Figure-59**).

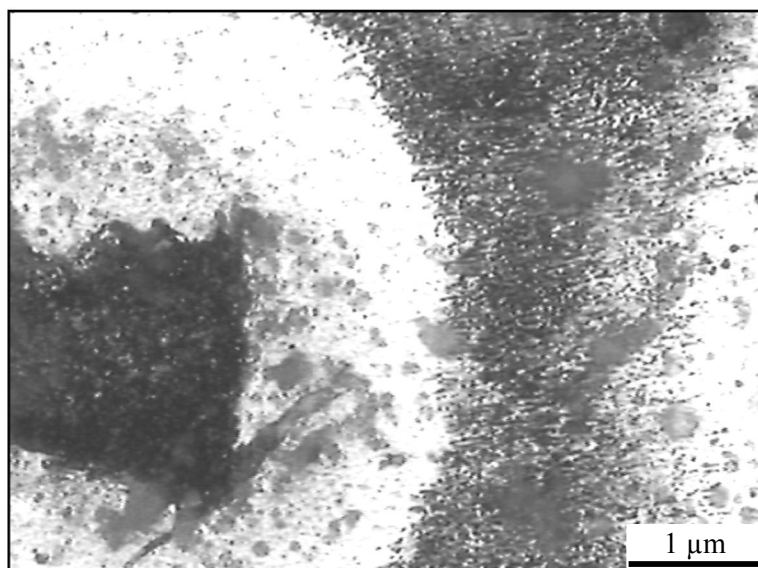
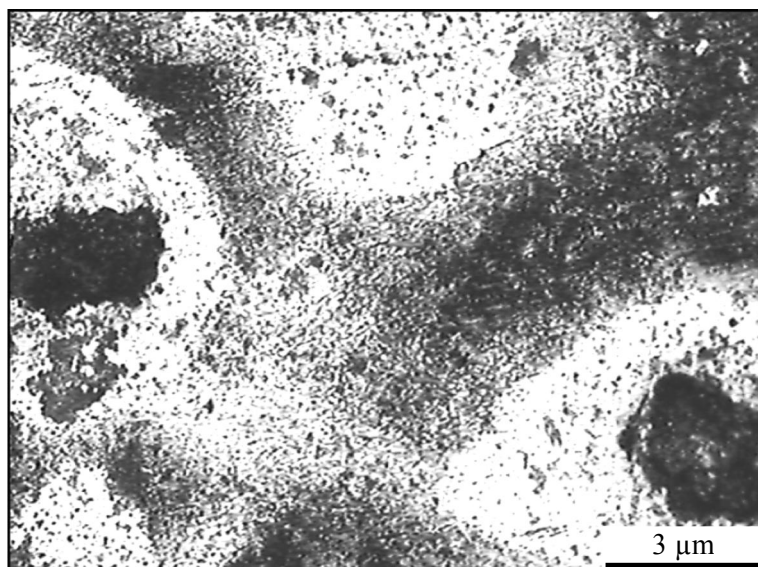
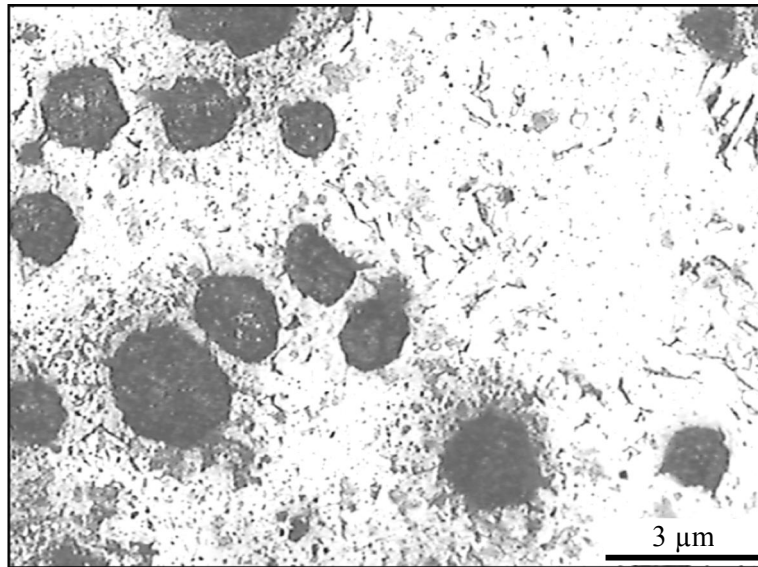


Figure-59: La fonte GSA à la température 700°C × 500.

-La température 840°C présente le début de la transformation de la structure initiale perlitique en une nouvelle structure qui fait apparaître des traces de martensite à peine discernable (**Figure-60**) qui le confirme par une légère augmentation de la dureté, ceci nous permet de nous prononcer sur la température **A1min** du début de la transformation : Perlite (P) → Austénite (γ).



La **figure**
correspondant

ansformation

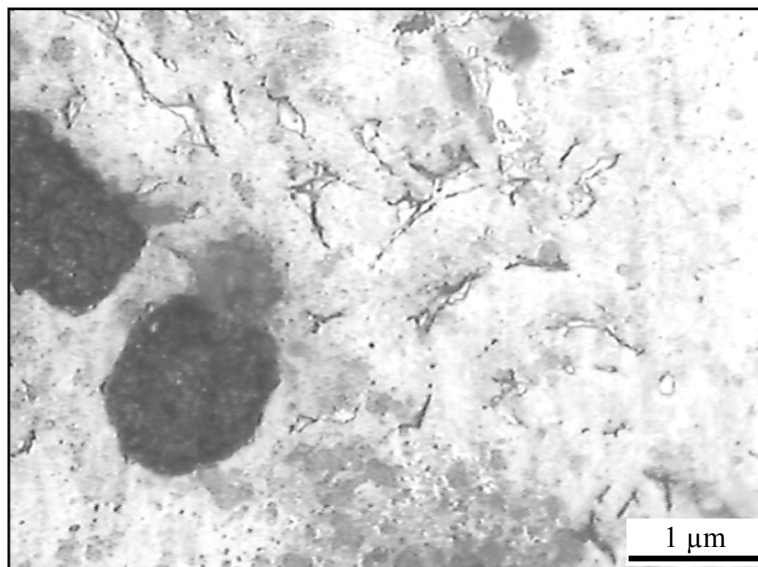
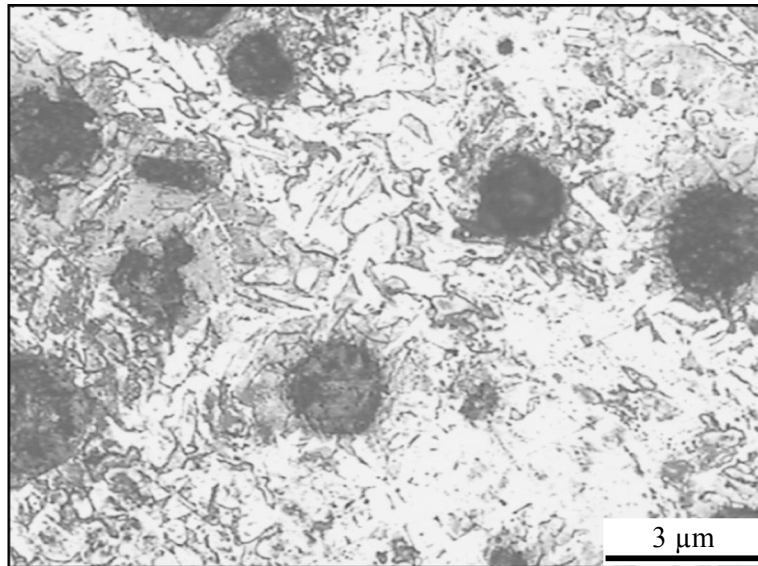


Figure-61: La fonte GSA à la température 840°C × 500.

-La température 860°C confirme la progression de la transformation de la perlite en austénite enrichie ($P \rightarrow \gamma_{\text{enrichie}}$), puis lors du refroidissement, la transformation de l'austénite enrichie en martensite et austénite résiduelle ($\gamma_{\text{enrichie}} \rightarrow M + \gamma_{\text{résiduelle}}$). La dureté de 464HB approuve l'existence effective de la martensite et de l'austénite résiduelle (**Figure-62**).



-La température de chauffage et de refroidissement est de 601HB (**Figure-63**).

La dureté est de 601HB.

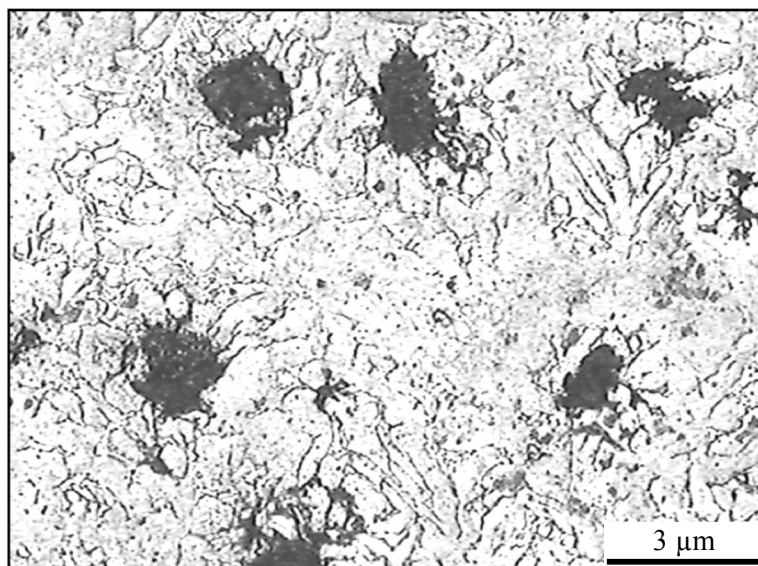


Figure-63: La fonte GSA à la température 880°C × 200.

La **figure-63** et **64** illustre la forme déchiquetée du graphite dû à l'effet du diffusion du carbone libre en carbone permettant d'enrichir l'austénite.

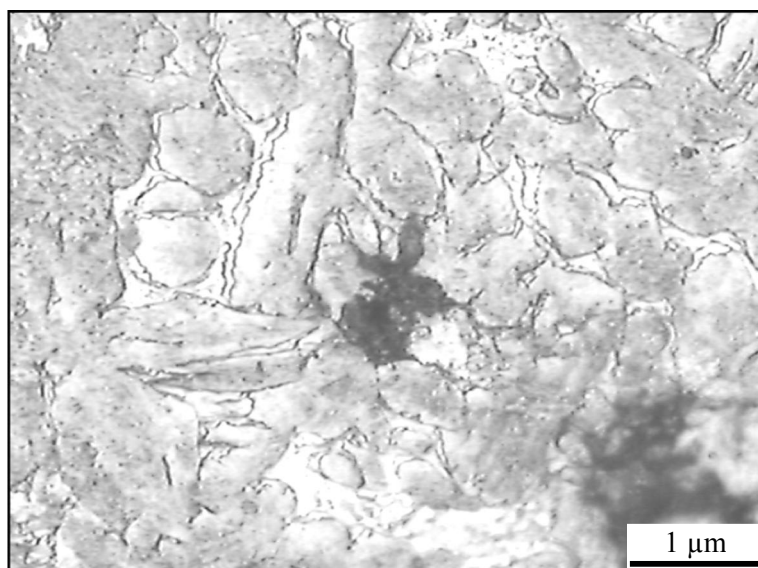


Figure-64: La fonte GSA à la température 880°C × 500.

2.3. La variation du taux de graphite

On calcule le taux de graphite à chaque température de trempe dans l'eau, les résultats sont donnés dans le **Tableau-13**, et schématisés dans la **Figure-65**.

Tableau-13: Les valeurs du taux de graphite.

Température (°C)		680	700	720	740	760	780	800	820	840	860	880	900
Taux de Graphite (%)	Ft25	L'hétérogénéité du taux de graphite et la forme ne nous permettent pas d'effectuer une analyse quantitative											
	GSC	17,13	16,43	18,51	19,21	18,28	18,06	18,51	18,28	19,21	15,74	15,02	15,40
	GSA	12,73	13,65	11,11	12,96	17,12	16,66	14,81	12,50	24,07	20,13	12,73	15,74

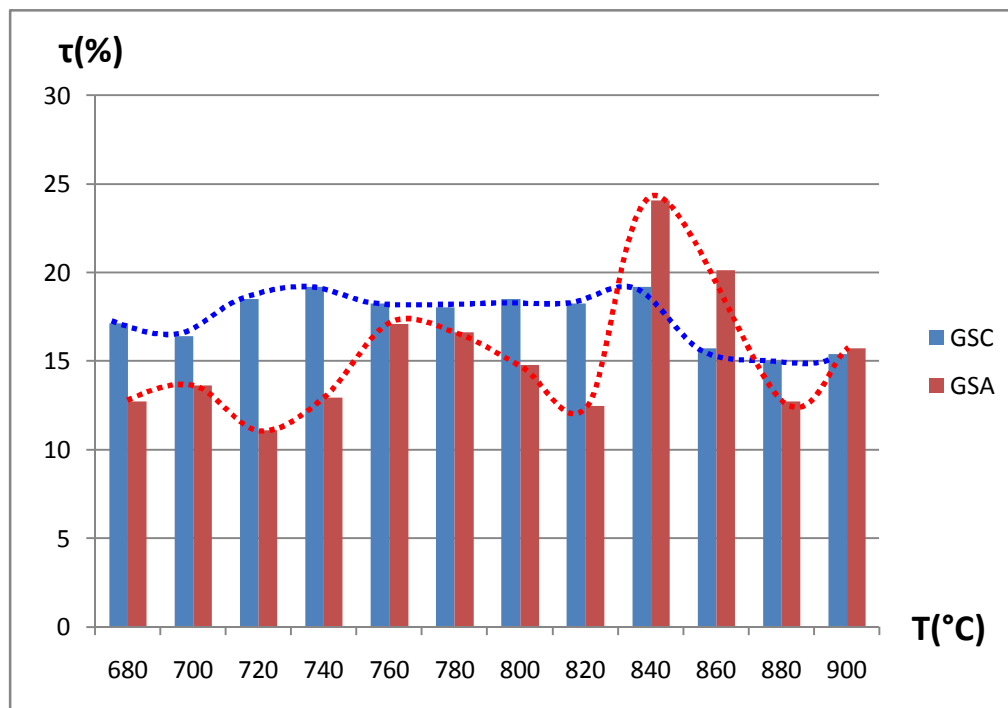


Figure-65: Le taux de graphite en fonction de la température.

On remarque que l'effet de graphitisation est apparent dans le domaine de température caractérisant la transformation de la perlite lamellaire en perlite globulaire pour la fonte GSA.

L'effet de graphitisation est plus favorable dans la fonte GSA que dans la fonte GSC à cause du taux de perlite élevé qui se transforme en perlite globulaire puis en graphite sphéroïdale.

A la température de 840°C on considère que la transformation de la perlite lamellaire en perlite globulaire est complète, donc l'effet de graphitisation est plus favorable. D'où le taux de graphite est élevé.

Les maintiens aux températures de 860°C, 880°C et 900°C ne passent pas par la transformation : $P_{\text{lamellaire}} \rightarrow P_{\text{globulaire}}$. D'où on n'a pas l'effet de graphitisation accentué tel que dans le cas de la température de 840°C (**Figure-65**).

Concernant la fonte GSA, les chauffages de 840°C et de 860°C ne sont pas recommandés, vu l'effet de graphitisation important qui est respectivement de 24% et 20%.

3. ÉTUDES STRUCTURALES ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Le **tableau-14** nous donne les valeurs de la dureté, la résistance mécanique (R), le module d'élasticité (E) et l'allongement (A), à chaque température de la trempe dans l'huile, dans le domaine austénitique (γ) et le domaine de la bande triphasée (**B.T**).

Tableau-14: Les caractéristiques mécaniques après chauffage pendant deux heures suivi d'une trempe dans l'huile puis d'un revenu.

Type de fonte		R (MPa)	E (MPa)	A (%)	Dureté (HB)
Ft25	B.T *	770	560	4,5	187
	Austénite **	950	730	3	252
GSC	B.T *	860	620	12,5	213
	Austénite **	1050	860	10	298
GSA	B.T *	930	710	7	444
	Austénite **	1140	915	4,8	514

(*) : Ft25 -T = 800°C ; GSC -T = 865°C ; GSA -T = 865°C.

(**) : Ft25 -T = 865°C ; GSC -T = 910°C ; GSA -T = 910°C.

Après la trempe dans l'huile, les propriétés mécaniques (R, E, HB et A%) très élevées de la fonte GSA et ce comparativement à la fonte GSC, par contre l'allongement dans la fonte GSC est plus élevée que dans la fonte GSA, vu sa matrice initiale qui est perlitique.

Concernant la fonte Ft25, l'allongement et la résistance à la rupture sont faibles, ainsi que la dureté est plus élevée.

On constate également que l'allongement après une trempe dans l'huile suivie d'un revenu, est plus élevé dans le domaine de la bande triphasée que dans le domaine austénitique.

3.1. A partir d'un traitement thermique dont le chauffage dans la bande triphasée

a. La fonte Ft25

À La température 800°C, apparemment la température choisie pour la BT ne nous a pas permis d'obtenir les résultats exemptés (**Figure-66**), vu les propriétés mécaniques très basses de la dureté 187 HB et la charge de rupture 770 MPa. Les parties distinctes de la matrice restent ferritique et la plage ayant subi des transformations de chauffage de trempe et de revenu, cette dernière étant une structure de revenu.

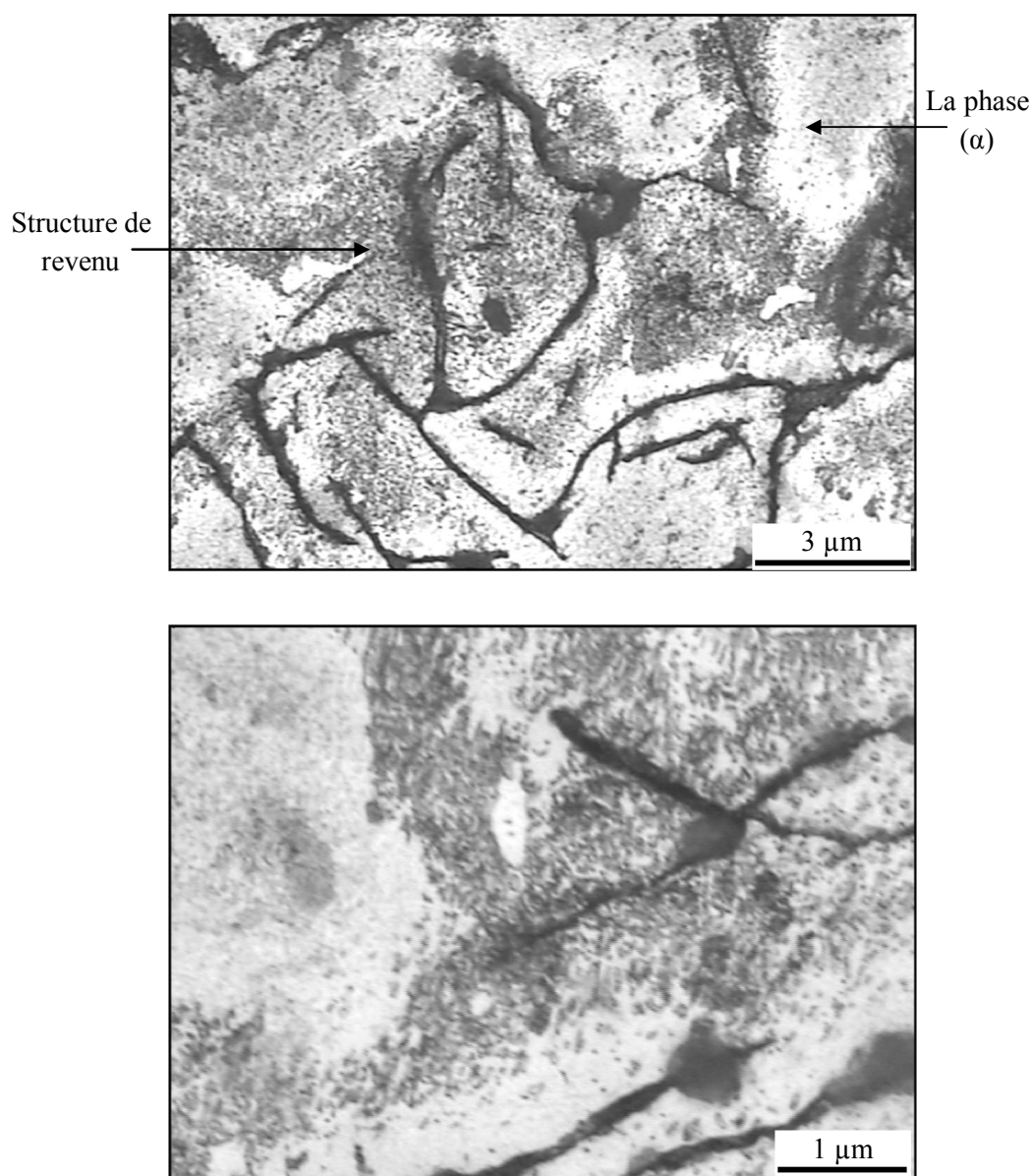


Figure-66: La fonte Ft25 après trempe dans l'huile à 800°C suivie d'un revenu.

b. La fonte GSC

À La température 865°C, les micrographies de la **figure-67** présentent des plages ferritique à proximité du graphite dans la zone III, on constate une structure de revenu.

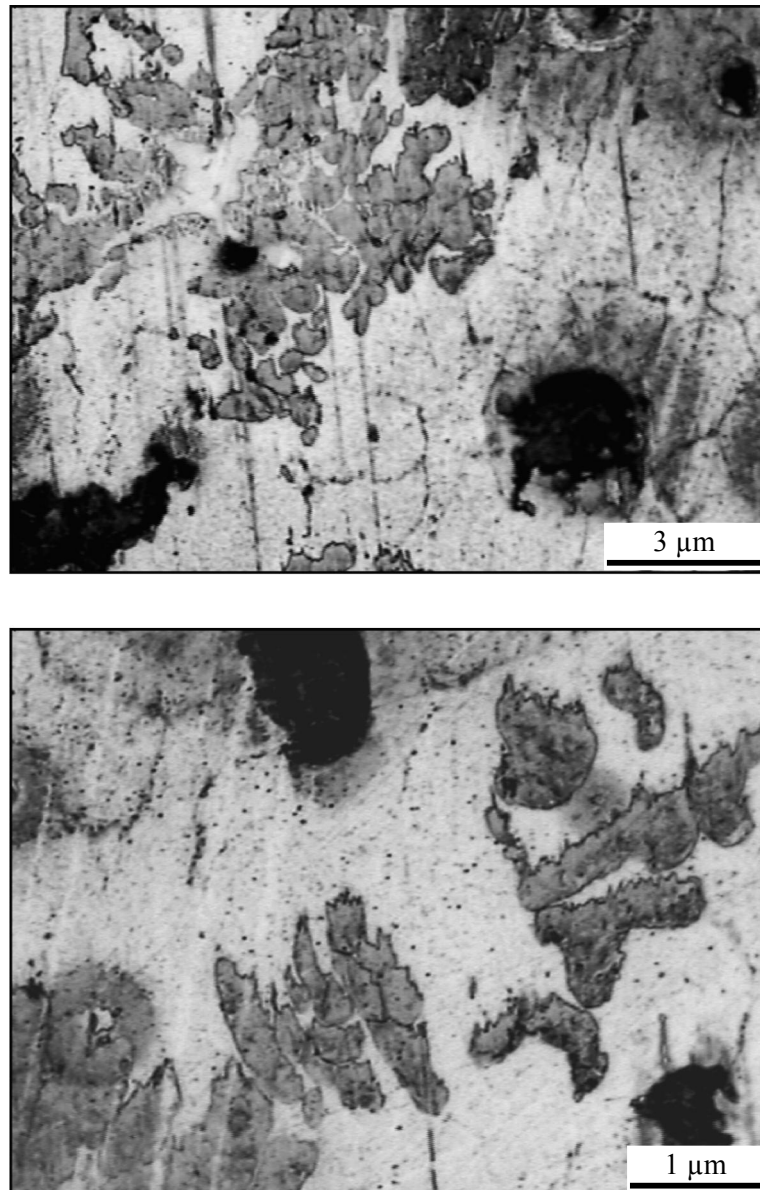


Figure-67: La fonte GSC après trempe dans l'huile à 865°C suivie d'un revenu.

c. La fonte GSA

À La température 865°C, la structure de la **figure-68** met en évidence des traces de ferrite, vu que son taux dans la matrice est faible. Le restant de la structure majoritaire est une structure de revenu.

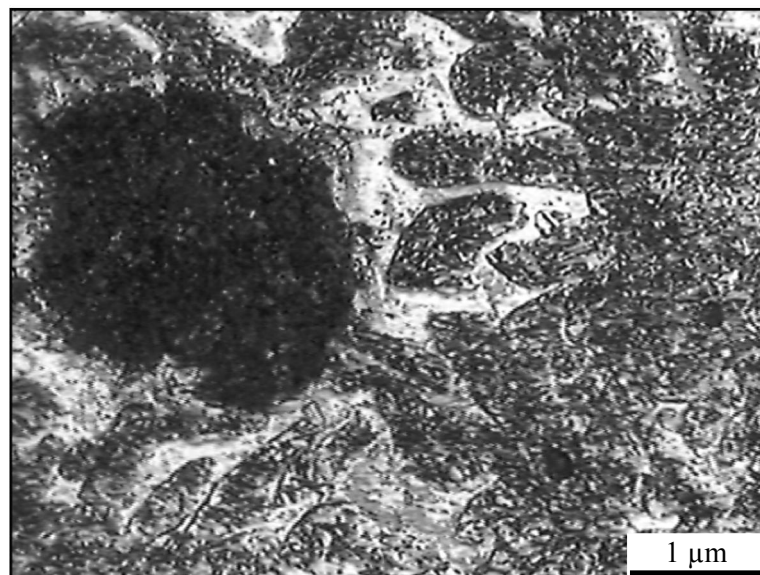
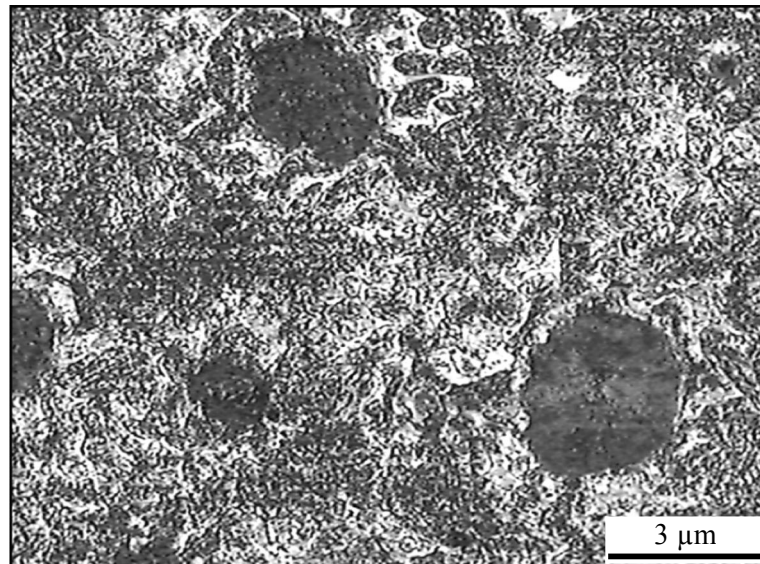


Figure III-68: *La fonte GSA après trempe dans l'huile à 865°C suivie d'un revenu.*

3.2. A partir d'un traitement thermique dont le chauffage supérieur à la température A_{1max}

a. La fonte Ft25

La température 850°C provoque une transformation totale, vu que la matrice est une structure de revenu (**Figure-69**). Les propriétés mécaniques de dureté et de charge de rupture sont faibles par rapport à celle de la GSA. Par contre l'allongement est très faible, vu la morphologie du graphite.

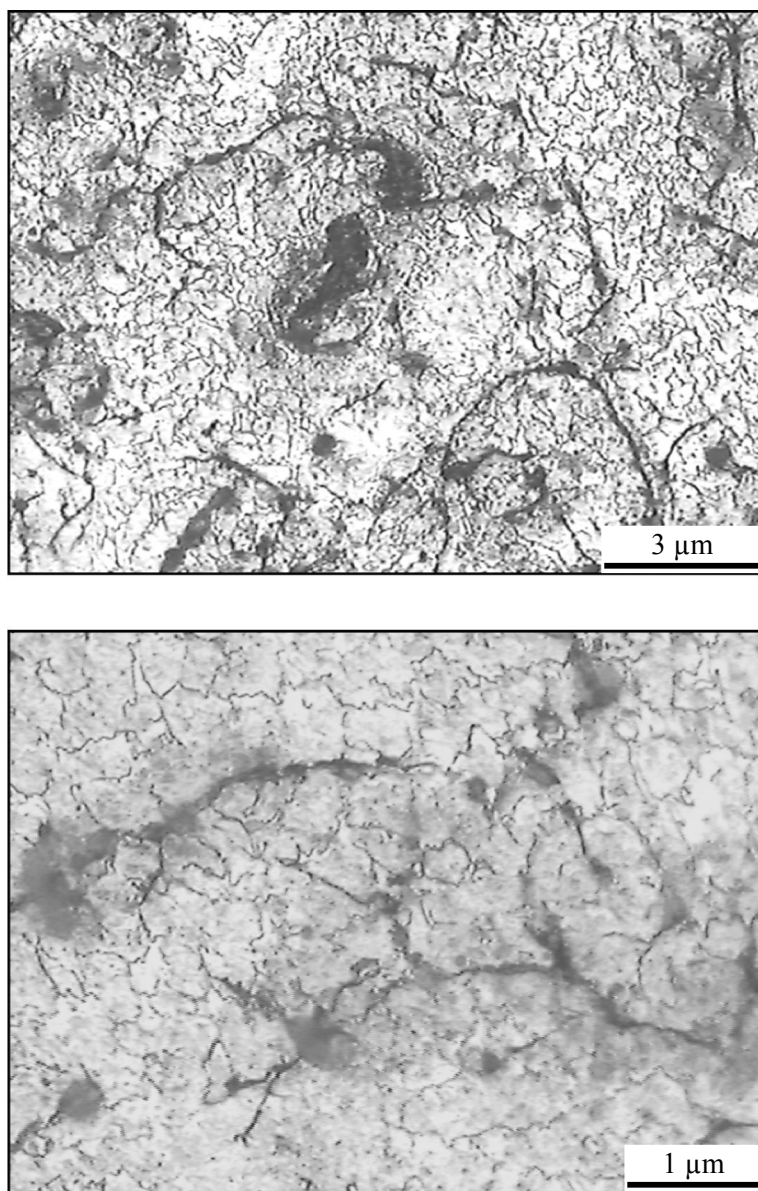


Figure-69: La fonte Ft25 après trempe dans l'huile à 850°C suivie d'un revenu.

b. La fonte GSC

À La température 910°C, la **figure-70** présente une structure de revenu dont toute la matrice a subi des transformations, à la température de 380°C l'austénite résiduelle et la martensite se sont appauvries en carbone pour obtenir les carbures (Fe_xC_y) et la ferrite (α).

La valeur de l'allongement est intéressante (10%) conjointement à la charge de rupture qui est de 1050 MPa.

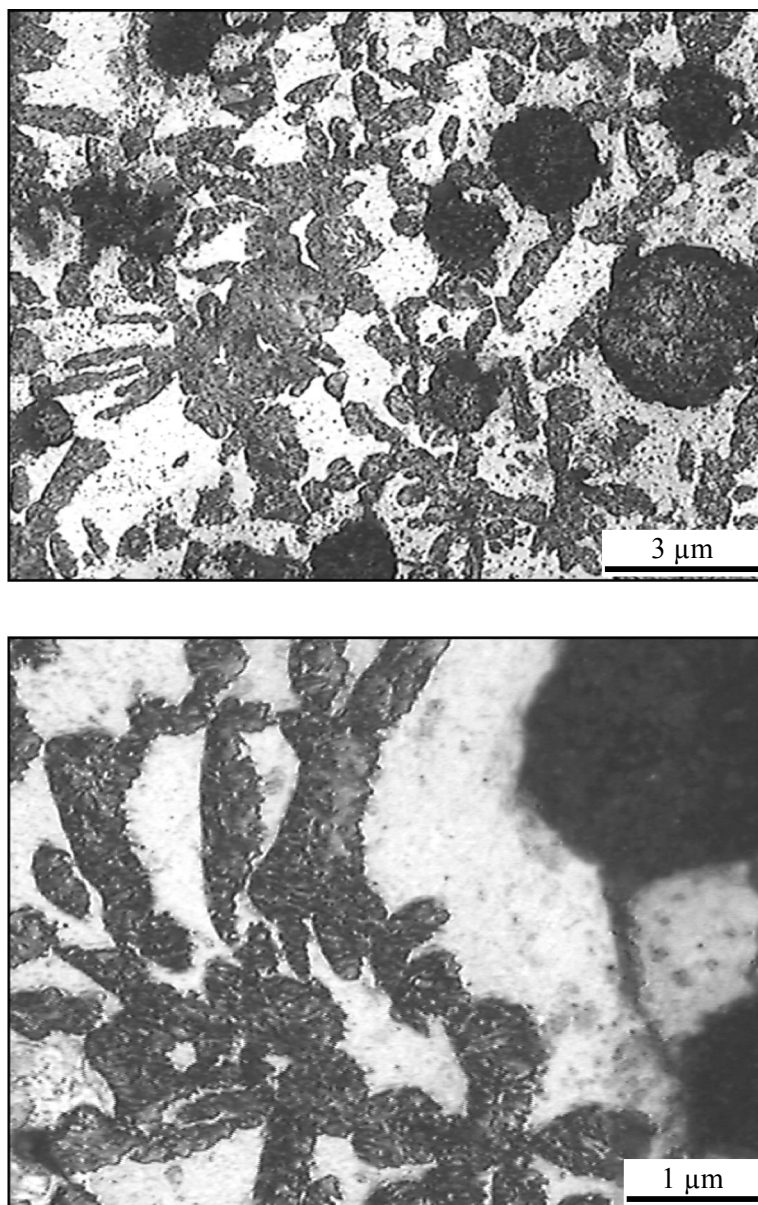


Figure-70: La fonte GSC après trempe dans l'huile à 910°C suivie d'un revenu.

c. La fonte GSA

À La température 910°C, la structure de la GSA (**Figure-71**) est une structure en phase transitoire de transformation : $M + \gamma_{\text{résiduelle}} \rightarrow Fe_xC_y + \alpha$.

La dureté et la charge de rupture sont élevées avec un allongement plus faible que dans le cas de la fonte GSC.

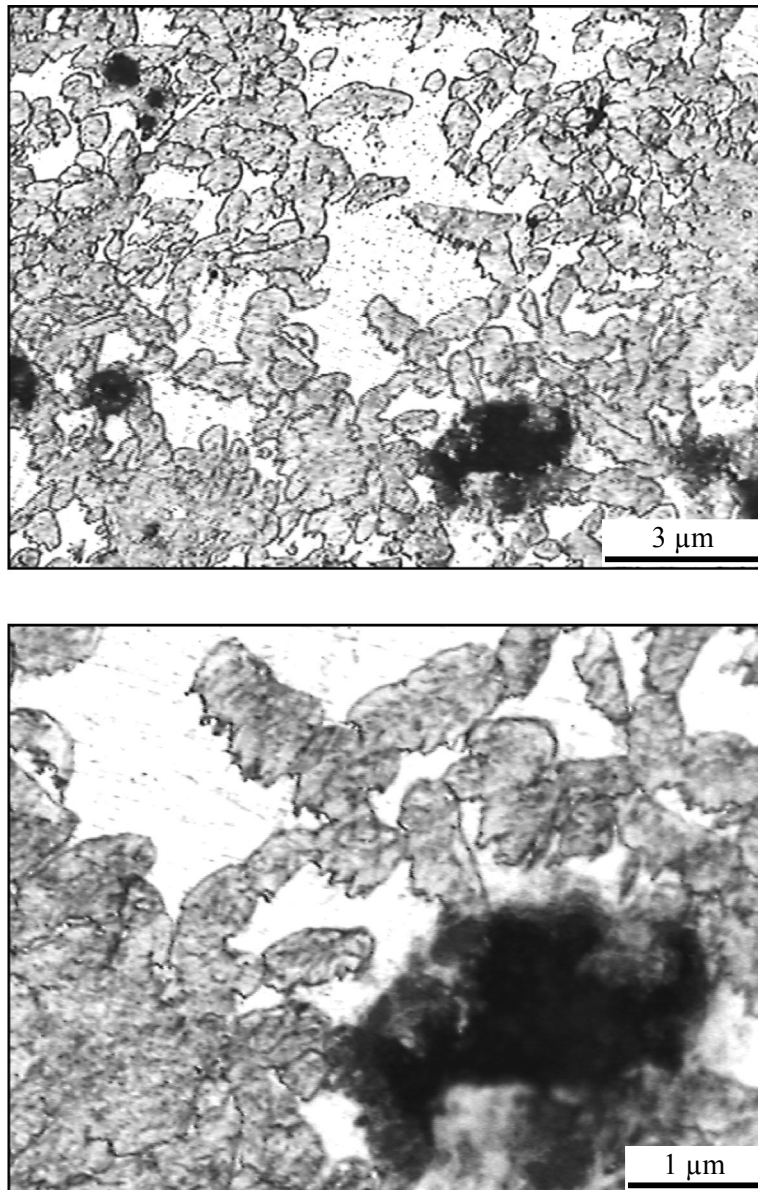


Figure-71: La fonte GSA après trempe dans l'huile à 910°C suivie d'un revenu.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

L'intérêt capital recherché dans ce travail, a été la détermination de la bande triphasée (BT) des fontes grises à graphite sphéroïdale et à graphite lamellaire, par l'utilisation de la méthode de traitements thermiques. Les résultats obtenus sont confirmés par l'étude métallographique à la température inférieure, à l'intérieure et à la température supérieure de la BT. Ainsi, notre étude nous a permis de mieux comprendre l'effet du chauffage sur les caractéristiques mécaniques et la morphologie structurale des fontes grises.

*Ce présent travail nous a conduit à une étude comparative entre les fontes à graphite sphéroïdale **GSC** et **GSA** et les fontes à graphite lamellaire **Ft25**.*

*A l'état brut de coulée les fontes **GSA** et la **Ft25** sont plus dures que la fonte **GSC**, dont la matrice est totalement perlitique en particulier pour la **Ft25** et avec un taux de 70% de perlite pour la **GSA**.*

*Après la trempe dans l'eau à différentes températures variant de 860°C à 920°C, nous avons déterminé la bande triphasée pour chaque type de fontes, qui pour la **GSC** est de l'ordre de 70°C, tandis que pour la **GSA** et la **Ft25**, elle est de l'ordre de 50°C. Les intervalles des températures des **BT** sont différents.*

*Dans cet intervalle de la **BT**, la dureté est variable et augmente jusqu'à la température $A1_{max}$. L'étude métallographique confirme cette variation de la dureté par la transformation de la structure initiale en une structure martensitique plus austénite résiduelle qui est plus dure.*

*L'effet de la graphitisation est plus favorable dans la fonte **GSA** que dans la fonte **GSC**. Concernant la fonte **GSA**, les chauffages de 840°C et de 860°C dans l'intervalle de la **BT** ne sont pas recommandés, vu l'effet de la graphitisation importante qui est respectivement de 24% et 20% de graphite.*

*Après la trempe dans l'huile, les propriétés mécaniques (R, E et HB) très élevées de la fonte **GSA** et ce comparativement à la fonte **GSC**, par contre l'allongement (A%) dans la fonte **GSC** est plus élevée que dans la fonte **GSA**, vu sa matrice initiale qui est perlitique.*

*Concernant la fonte **Ft25**, l'allongement et la résistance à la rupture sont faibles, par contre la dureté est plus élevée.*

On constate également que l'allongement après une trempe dans l'huile suivie d'un revenu, est plus élevé dans le domaine de la bande triphasée que dans le domaine austénitique.

*Du point de vue économique et comparativement aux aciers utilisés dans l'industrie, le coût des fontes **GSC** et **GSA** serait extrêmement bas, et ces dernières pourraient être une solution optimale pour des applications industrielles, en raison de leurs propriétés mécaniques élevées.*

Références Bibliographiques

- [1] S.PARENT-SIMONIN. "*Traitements des métaux*". (P. 18-24) Technique d'ingénieur, M62 (2003).
- [2] H.SERRAR. "*Etude comparative à l'abrasion entre les aciers au manganèse Z120m12 et les fontes à graphite sphéroïdal GS*". PEF, ENP (2006).
- [3] J.P.CHOBAUT. "*Hétérogénéité de la transformation bainitique dans les fonte à graphite sphéroïdale*". (P. 41), Thèse de Doctorat INPL (1987).
- [4] E.SALHI. "*Etude des fontes GS alliées traitées thermiquement et étude à l'aptitude à la soudure à l'arc électrique*". (P. 84-105), Doctorat ES-Sciences Physiques (janvier 1994).
- [5] K.HERFURTH. Giesse.Tech-19, (1974).
- [6] MICHELGERER. "*Métallurgie de fonderie, (fontes grises) T2*". (P. 150-155), Edition EYROLLES, Paris (1978).
- [7] Jean-Claude MARGERIE. "*Les produits moulés en fonte*". Centre Technique des Industries de la Fonderie 12, Avenue Raphaël 75016, Paris.
- [8] Jean Barralis et Gérard Maeder. "*Précis Métallurgie*". (P. 59-67), Edition : Nathan VUEF, 9 rue Méchain, 75014. Paris (2002).
- [9] Lakhtine. "*Métallographie et traitements thermiques des métaux*". Quatrième édition- Edition Mir, Moscou (1986).
- [10] I.MINKOFF. "*The physical metallurgie of cast iron*". (P. 35-40), Interscience Publication (1983).
- [11] JEAN-PAUL BAÏLON, JEAN-MARIE DORLOT. "*Des Matériaux, troisième édition*". (P. 504-508), Ecole Polytechnique de Montréal, Québec (2000).
- [12] G.Hilly Et C.Chaussin. "*Cours de métallurgie*" (pages 61-70) ,Troisième édition, Edition DUNOD. Paris (1967).

- [13] Michel Colombie et Coll. "*Matériaux industriels, Matériaux Métalliques*". Edition Dunod, Paris (2000).
- [14] ASM Handbook. Volume 1, "*Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*". (P.36), Edition Metals Handbook (1990).
- [15] A.RICHARD. "*La production, les propriétés et les applications des fontes GS bainitiques*". BCIRA, Alvechurch, Birmingham, Grande-Bretagne (1987).
- [16] J. C MARGERIE. "*Elaboration des fontes*". (P. 12-15), Technique de l'ingénieur, M760 (1995).
- [17] <http://lmi.cnrs.fr/spip/-Olivier-DEZELLUS>.
- [18] Jacques Chérière. "*Elaboration des fontes malléables*". Conseiller Technique de l'Association Française des Fonderies de Malléables, Ref M770
- [19] PARENT-SIMONIN. "*Traitements thermiques des fontes*". (P. 1-9), Techniques de l'Ingénieur, M 1 146 (1999).
- [20] MONCHOUX, J.P. "*Influence d'un recuit de ferritisation sur la microstructure et les mécanisme de fissuration*". Thèse Génie des matériaux : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (2000).
- [21] PARENT-SIMONIN, S.MARGERIE, J.C. "*Traitements thermiques des fontes, traité matériaux métalliques*". (P. 1-16), Techniques de l'Ingénieur, M 1 145 (2001).
- [22] A.IKHLEF, G.CIZERON. "*Analyse des stades de revenu de la fonte G.S. Influence de la teneur en silicium*". (P. 37-45), Traitement thermique (1984).
- [23] P.BALCOUCHE – Fonderie. "*Mémento de métallurgie appliquée*". (P. 50-73), Paris (1976).

ANNEXE I

1. LE CARBONE EQUIVALENT

L'examen des diagrammes ternaires Fe-C-Si et Fe-C-P montre que ces éléments conduisent à une diminution de la teneur en carbone de l'austénite eutectique, de l'eutectique et de l'eutectoïde.

La notion de carbone équivalent définie le plus souvent par la relation :

$$\% C_{\text{éq}} = \% C + \frac{1}{3} (\% Si + \% P)$$

2. LE MODULE D'ELASTICITE

Le module de Young (E) ou module d'élasticité ou encore module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et la déformation pour un matériau élastique isotrope.

La loi d'élasticité est la loi de Hooke :

$$\sigma = E\varepsilon$$

où :

- σ est la contrainte (en unité de pression),
- E est le **module de Young** (en unité de pression),
- ε est l'allongement relatif (adimensionnel).

D'après l'équation aux dimensions, le module de Young est homogène à une pression, ou plus précisément une contrainte. L'unité internationale est donc le pascal (Pa). Cependant, en raison des valeurs élevées que prend ce module, il est en général donné en méga-pascal (MPa) ou newton par millimètre carré (N/mm²).

3. LE CERTIFICAT OFFICIEL DES ANALYSES EFFECTUEES A L'URASM DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES FONTES ETUDIEES SE TROUVE DANS LA PAGE SUIVANTE.

ANNEXE II

LES FIGURES DE LA TREMPE DANS L'EAU DE LA FONTE Ft25

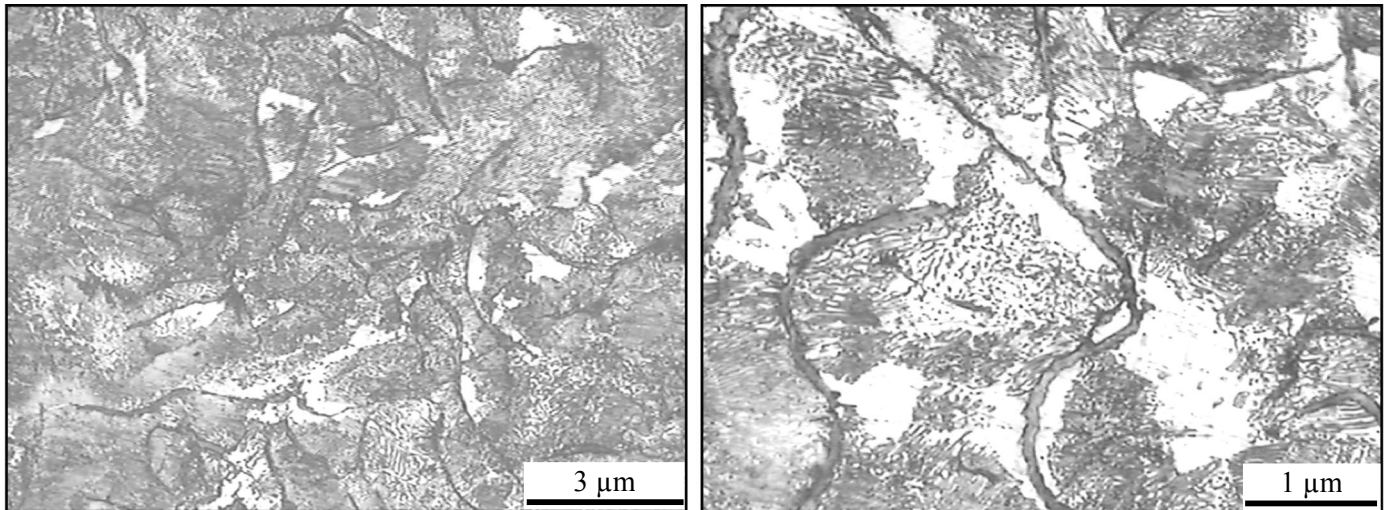


Figure 1: *La fonte Ft25 à la température 680°C.*

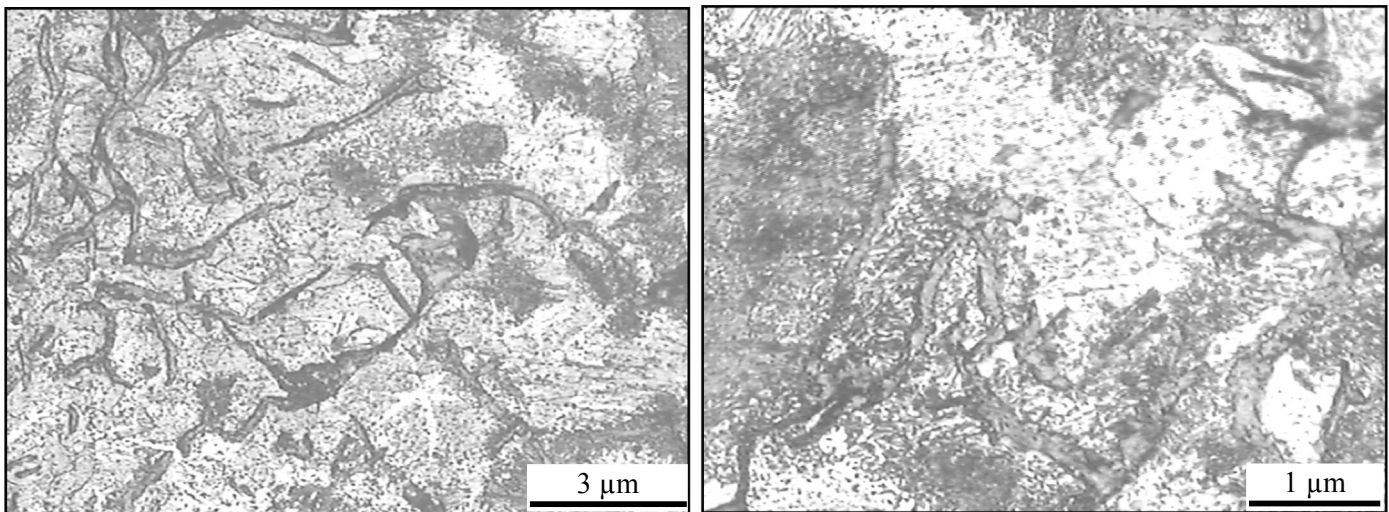


Figure 2: *La fonte Ft25 à la température 720°C.*

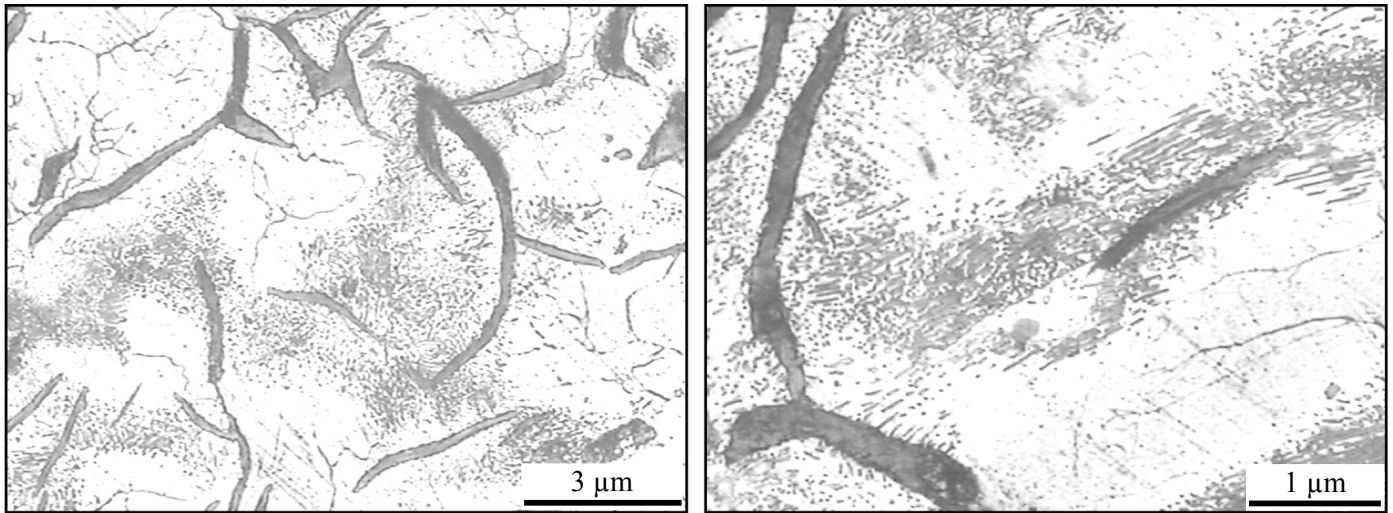


Figure 3: *La fonte Ft25 à la température 740°C.*

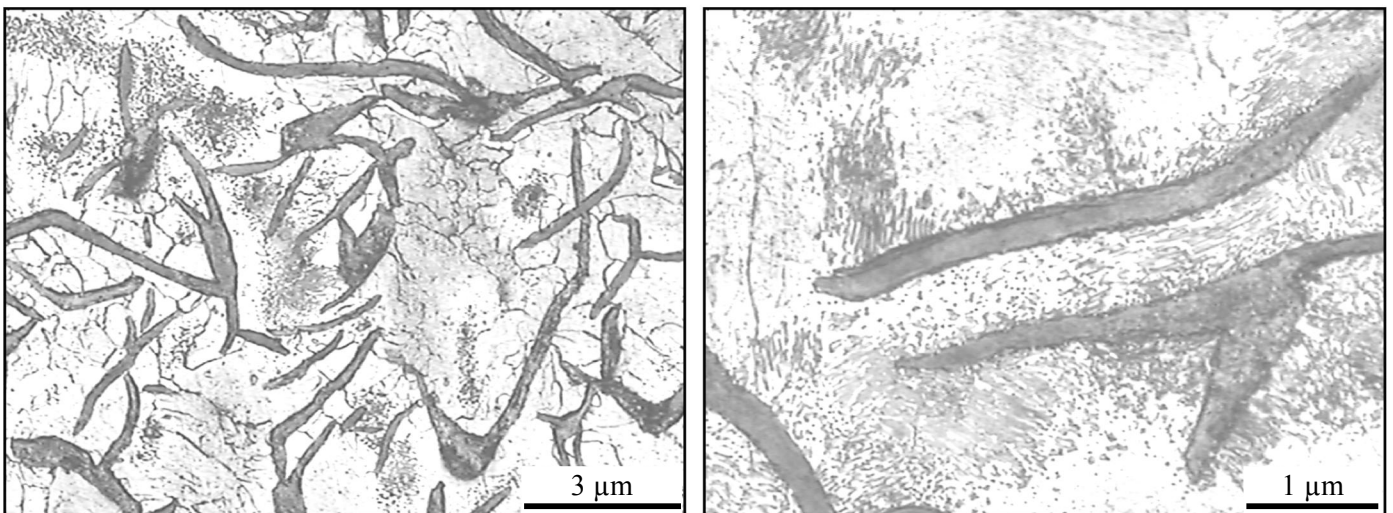


Figure 4: *La fonte Ft25 à la température 760°C.*

ANNEXE III

LES FIGURES DE LA TREMPE DANS L'EAU DE LA FONTE GSC

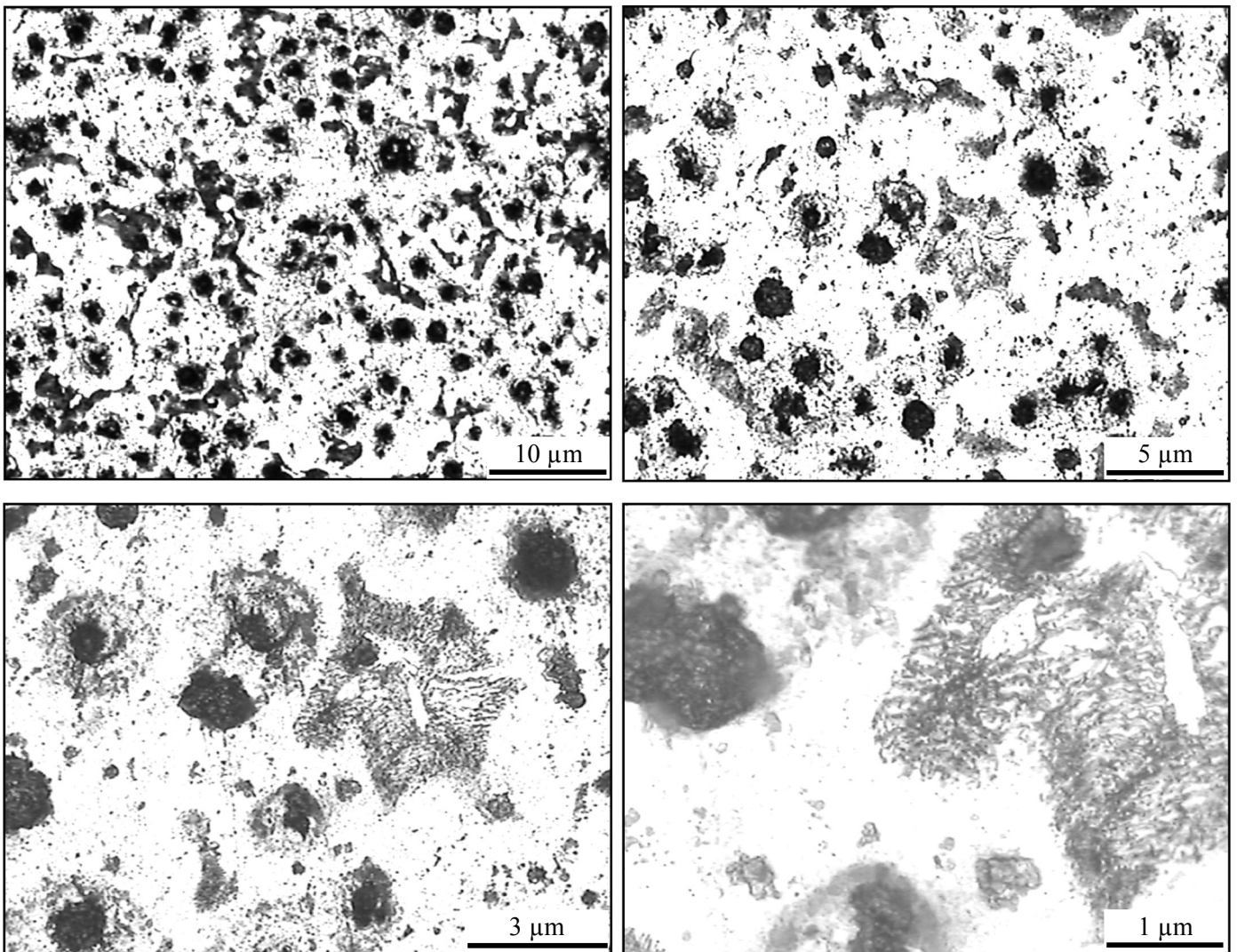


Figure 5: *La fonte GSC à la température 680°C.*

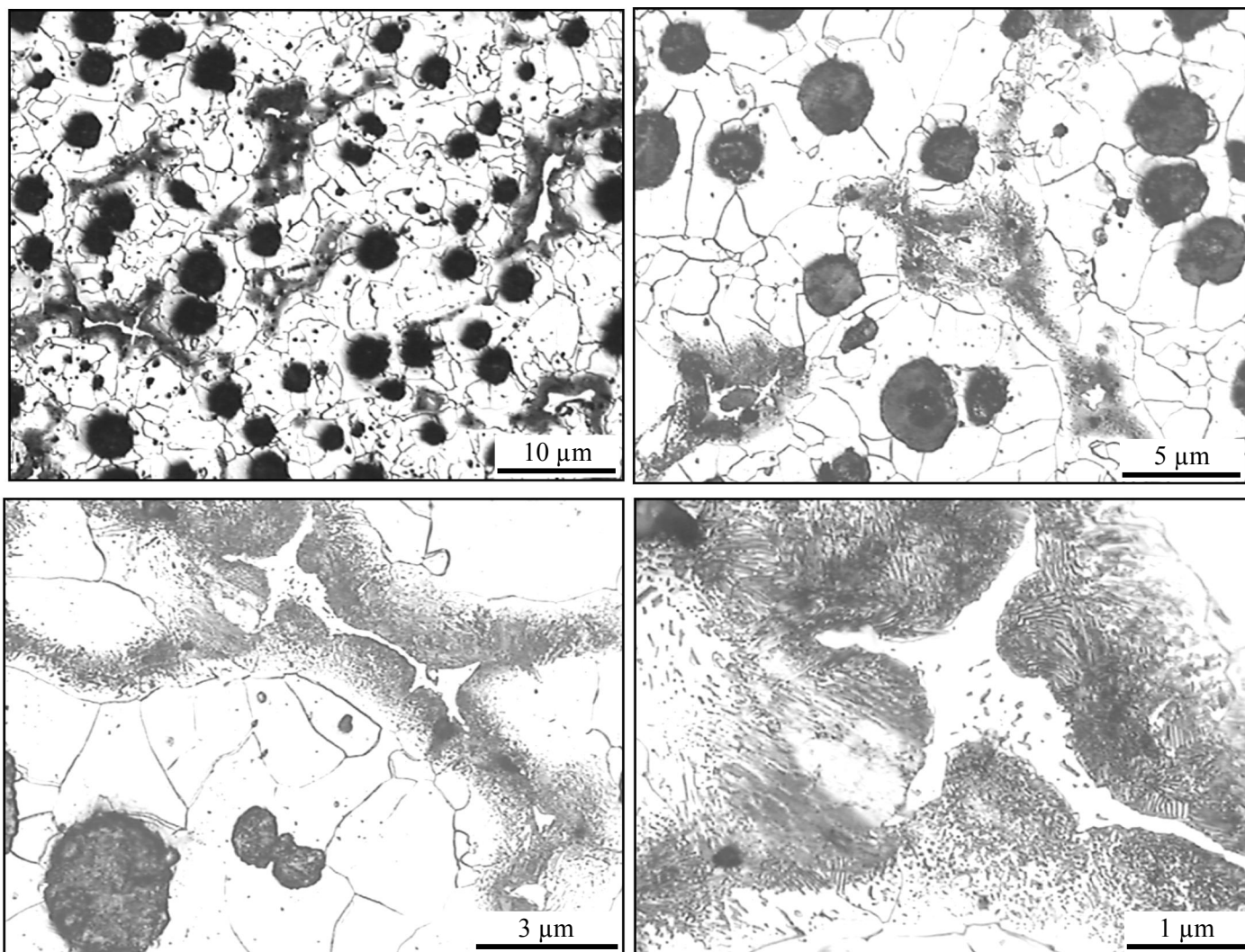
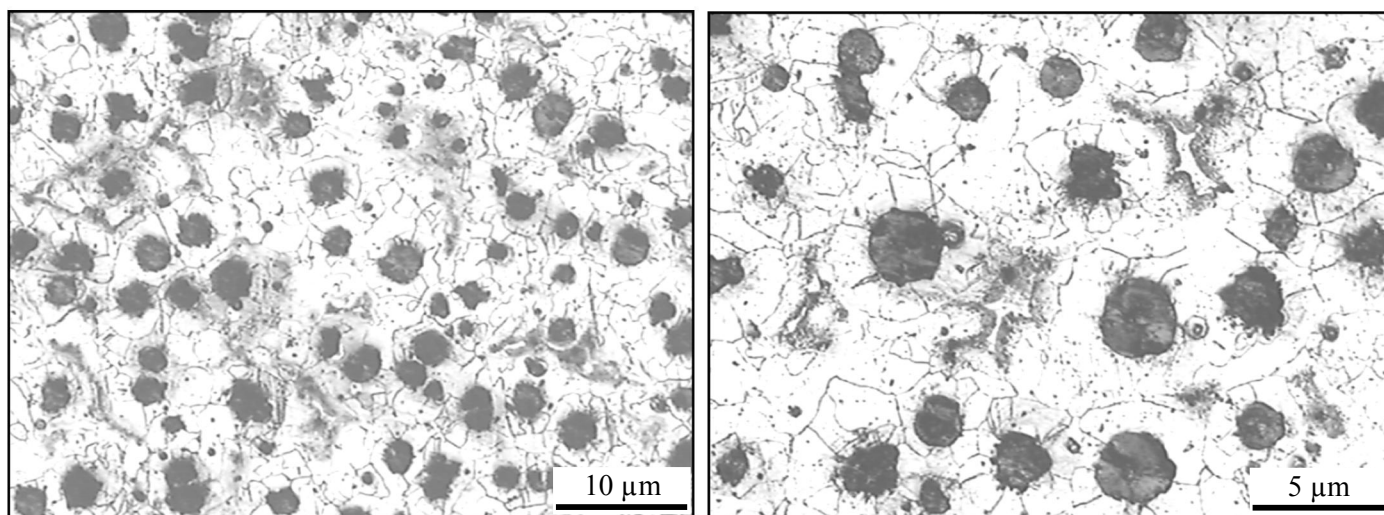


Figure 6: *La fonte GSC à la température 720°C.*



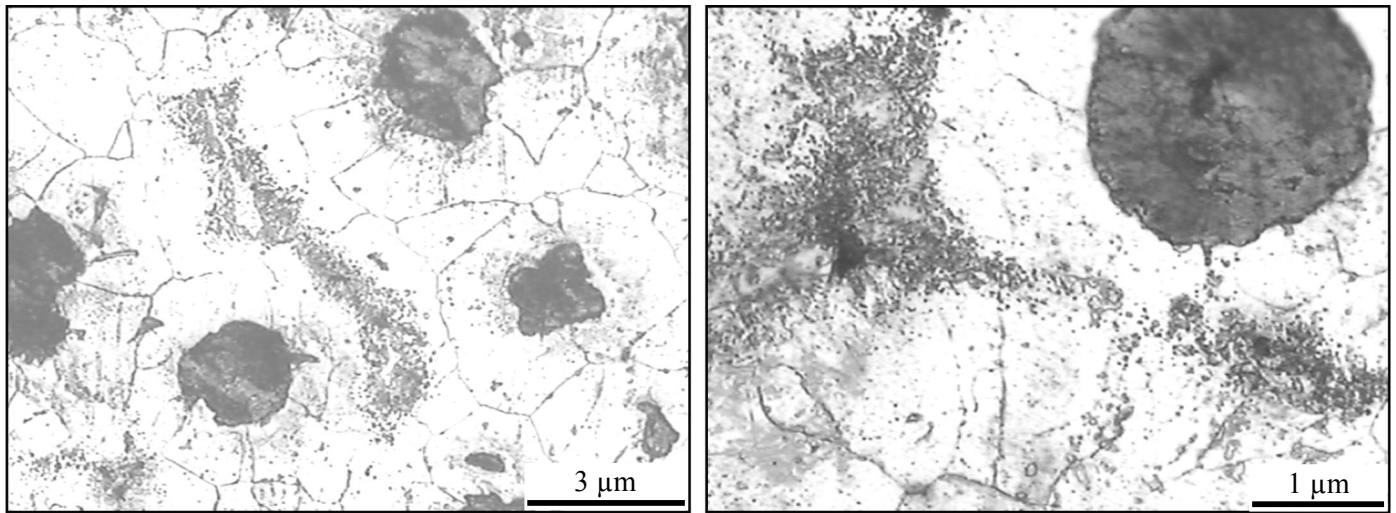


Figure 7: *La fonte GSC à la température 740°C.*

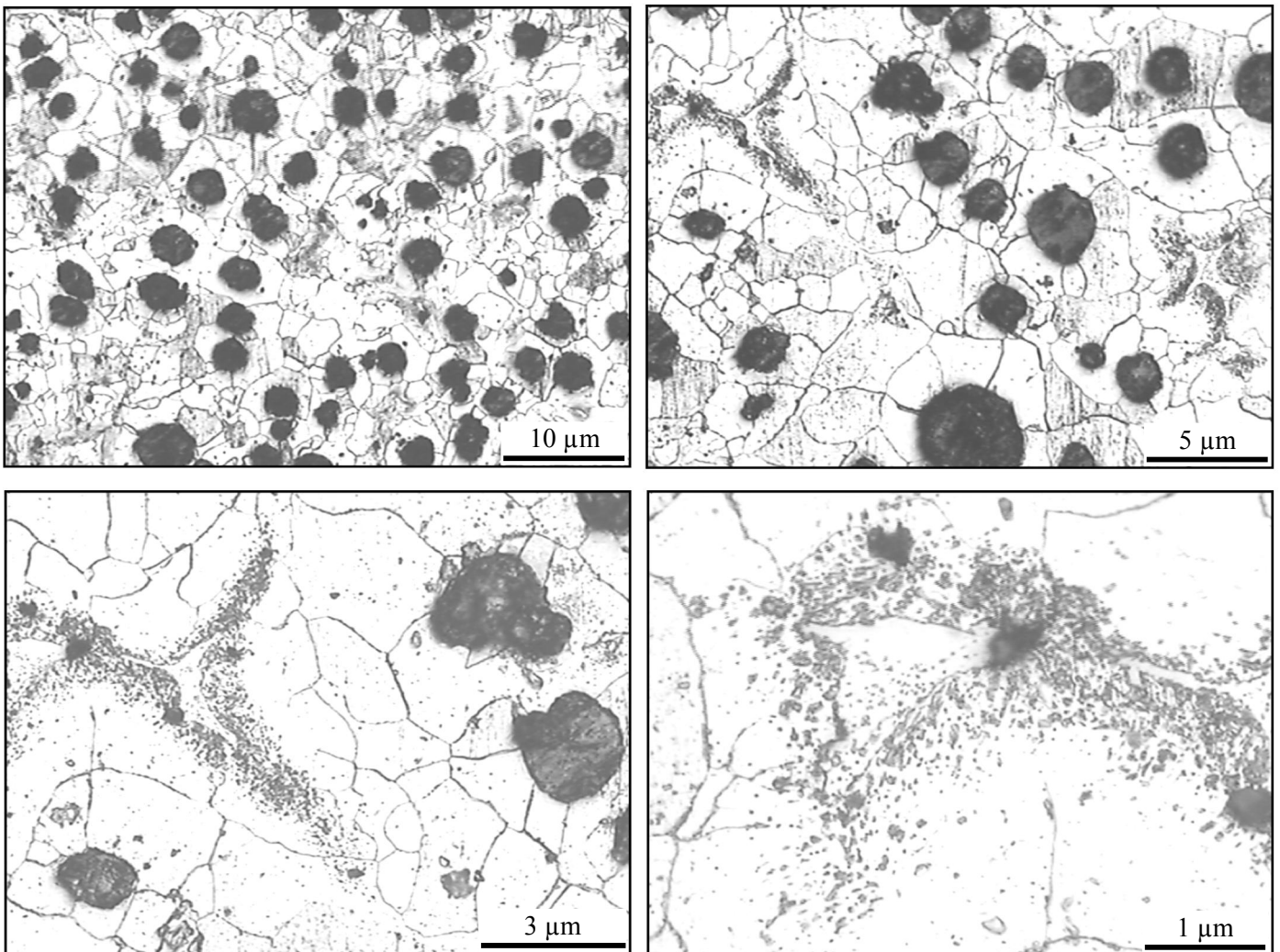


Figure 8: *La fonte GSC à la température 760°C.*

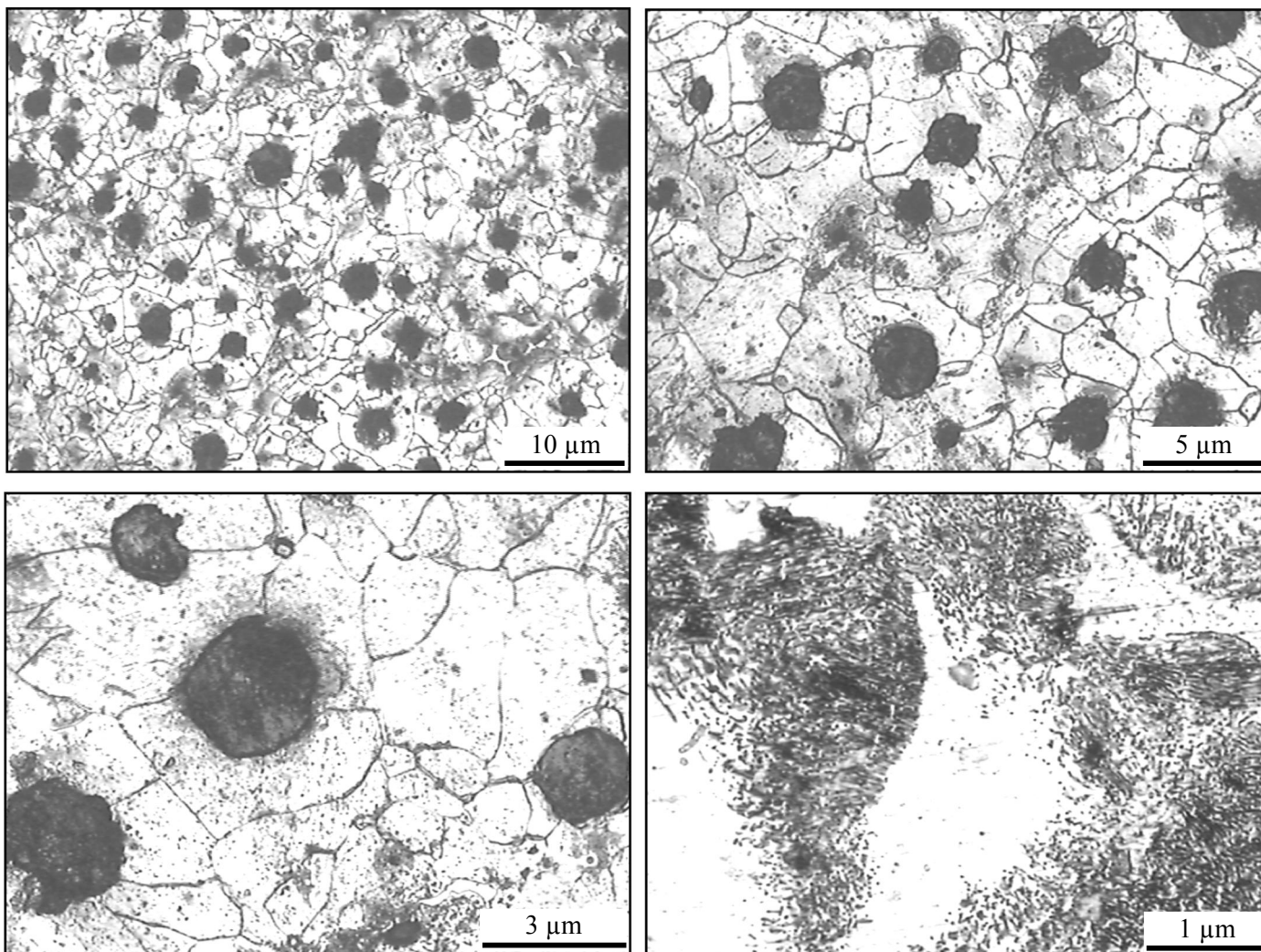
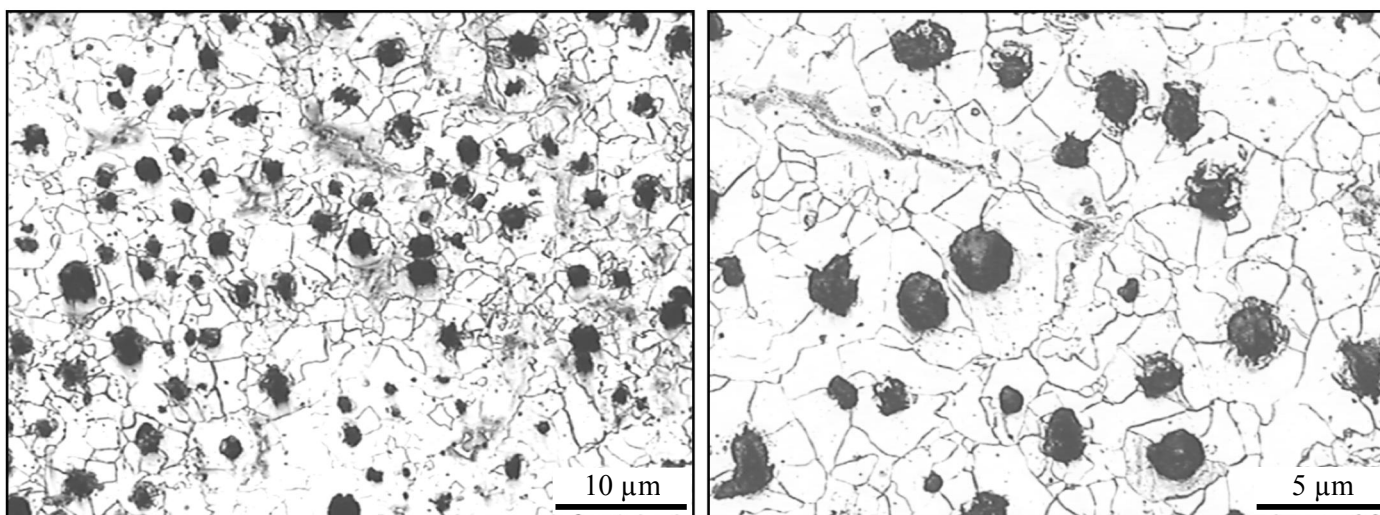


Figure 9: *La fonte GSC à la température 780°C.*



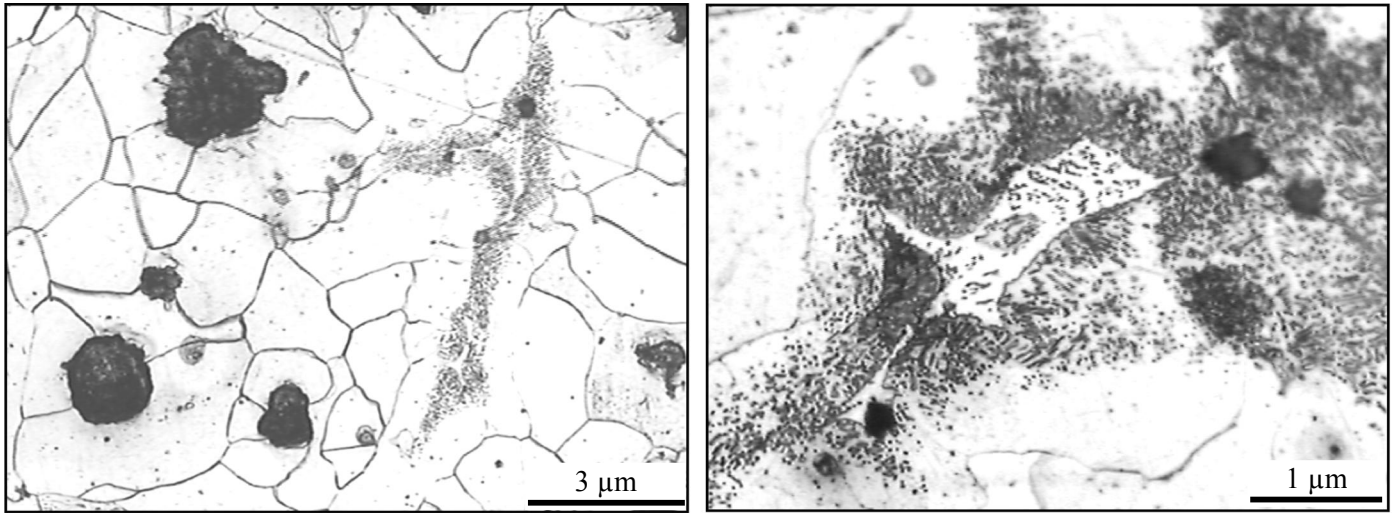


Figure 10: *La fonte GSC à la température 800°C.*

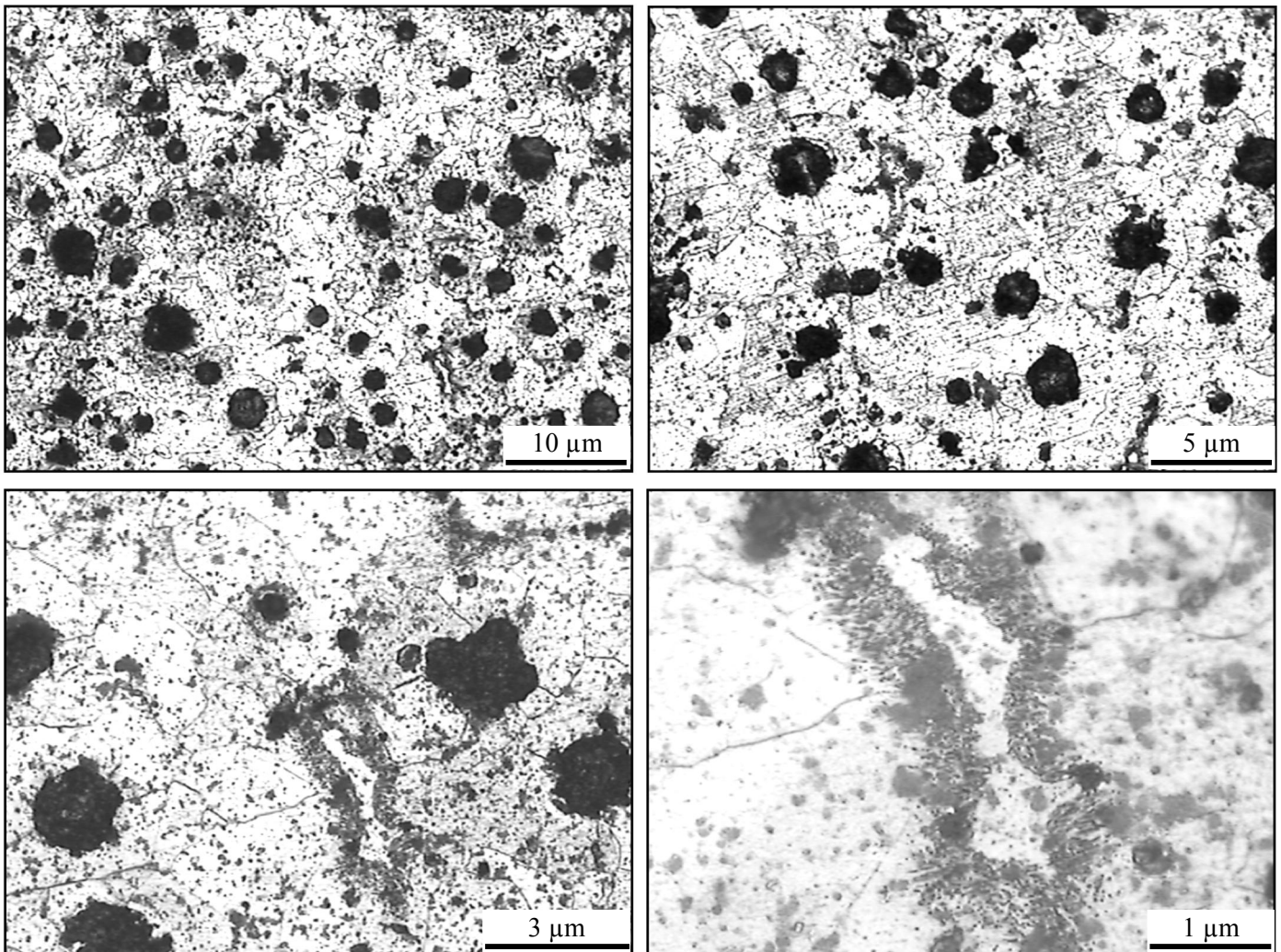


Figure 11: *La fonte GSC à la température 820°C.*

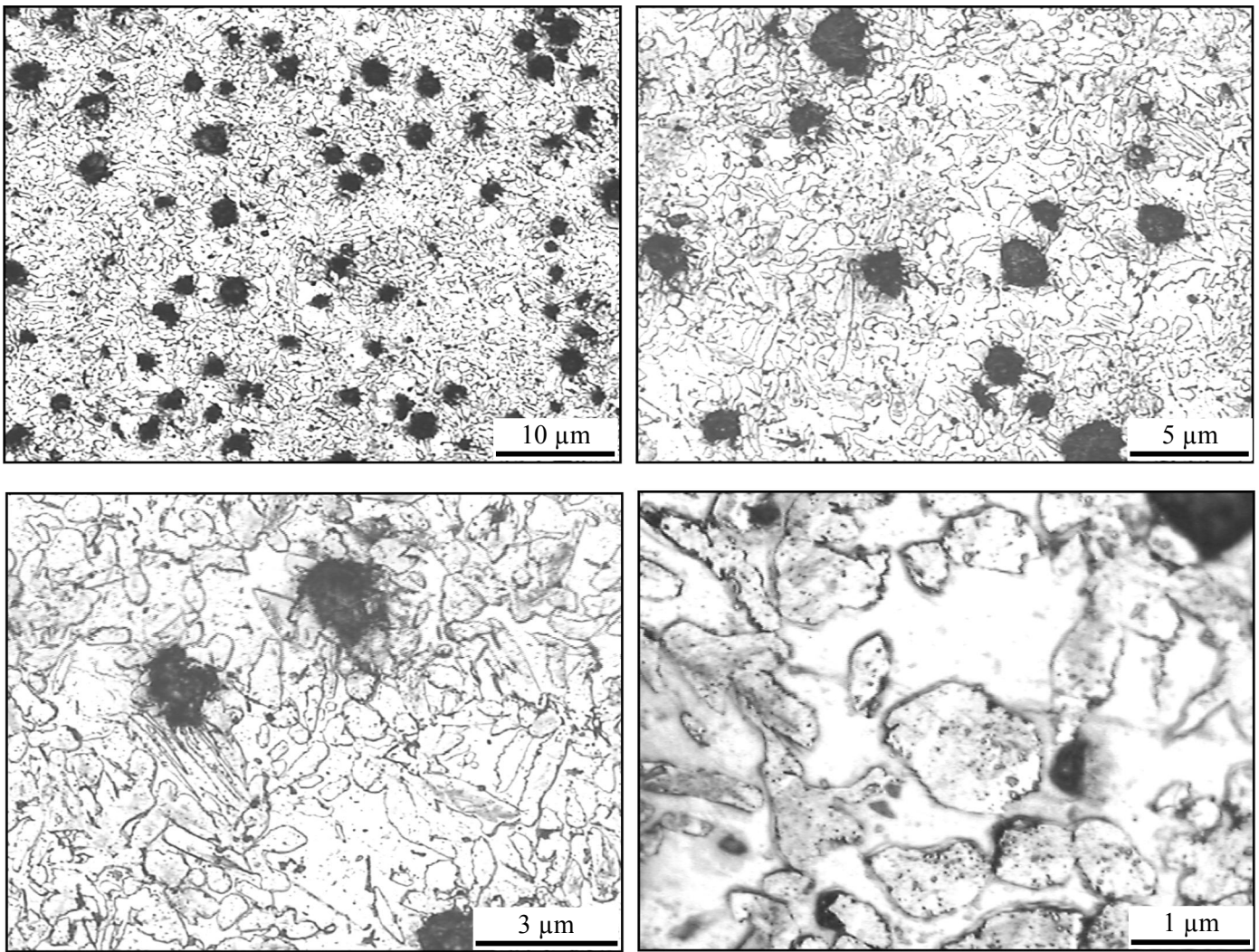


Figure 12: *La fonte GSC à la température 860°C.*

ANNEXE IV

LES FIGURES DE LA TREMPE DANS L'EAU DE LA FONTE GSA

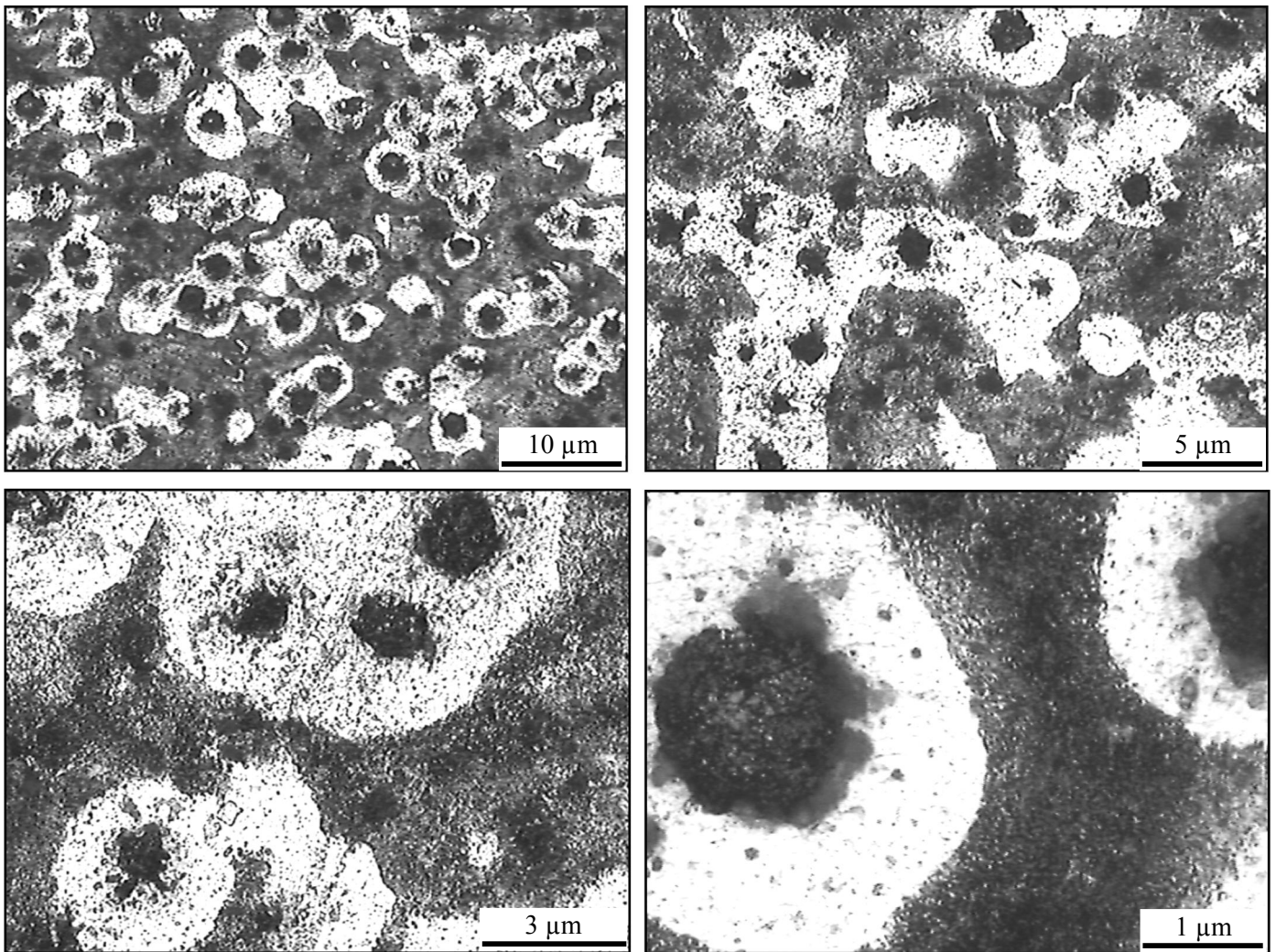


Figure 13: *La fonte GSA à la température 680°C.*

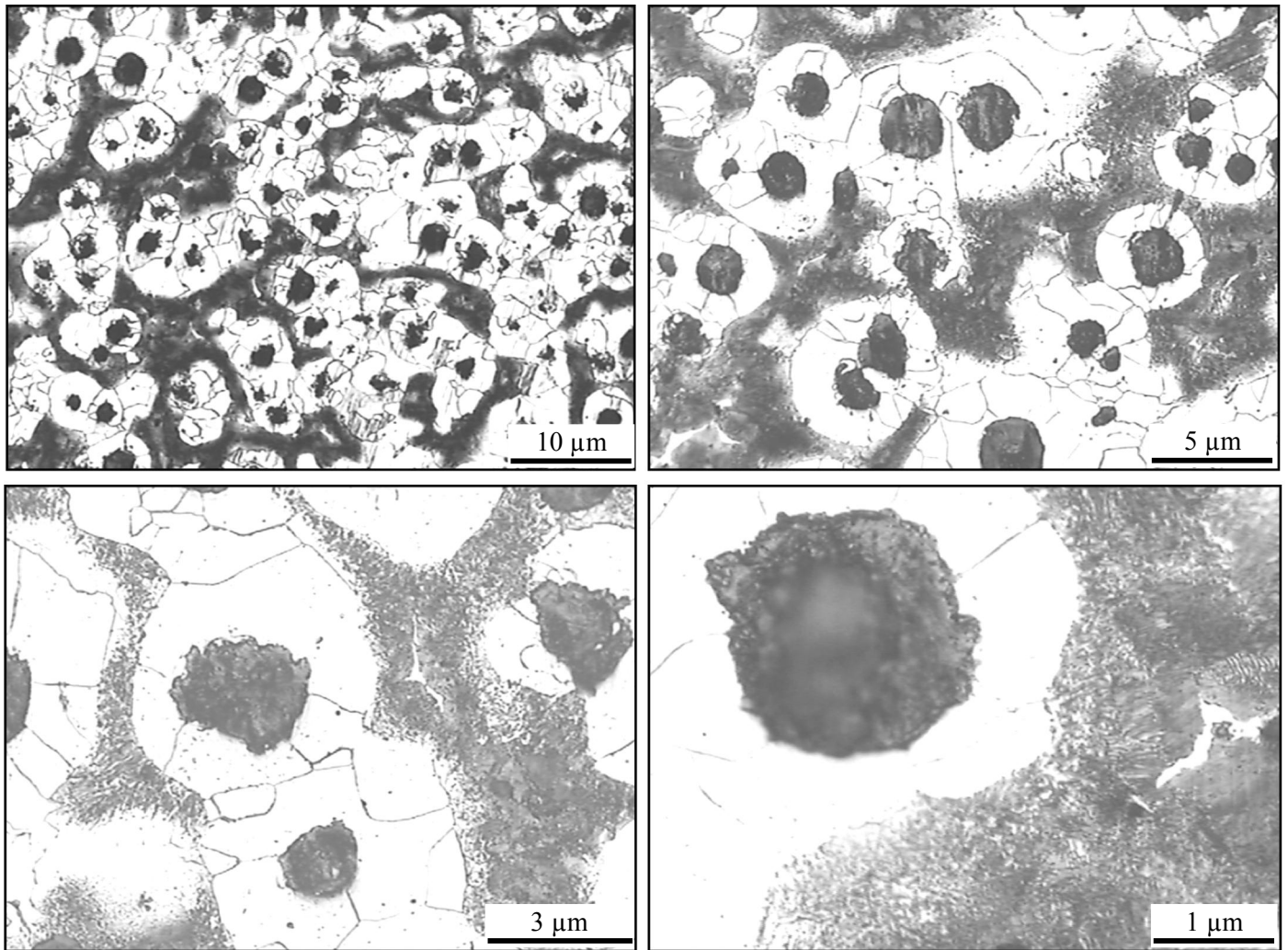
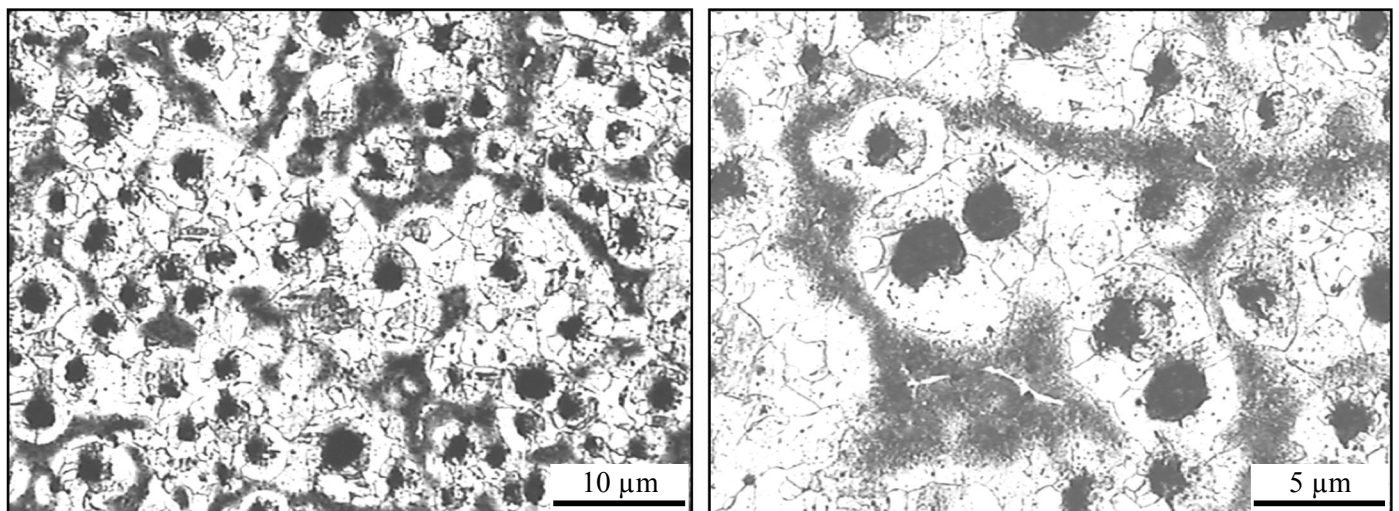


Figure 14: *La fonte GSA à la température 720°C.*



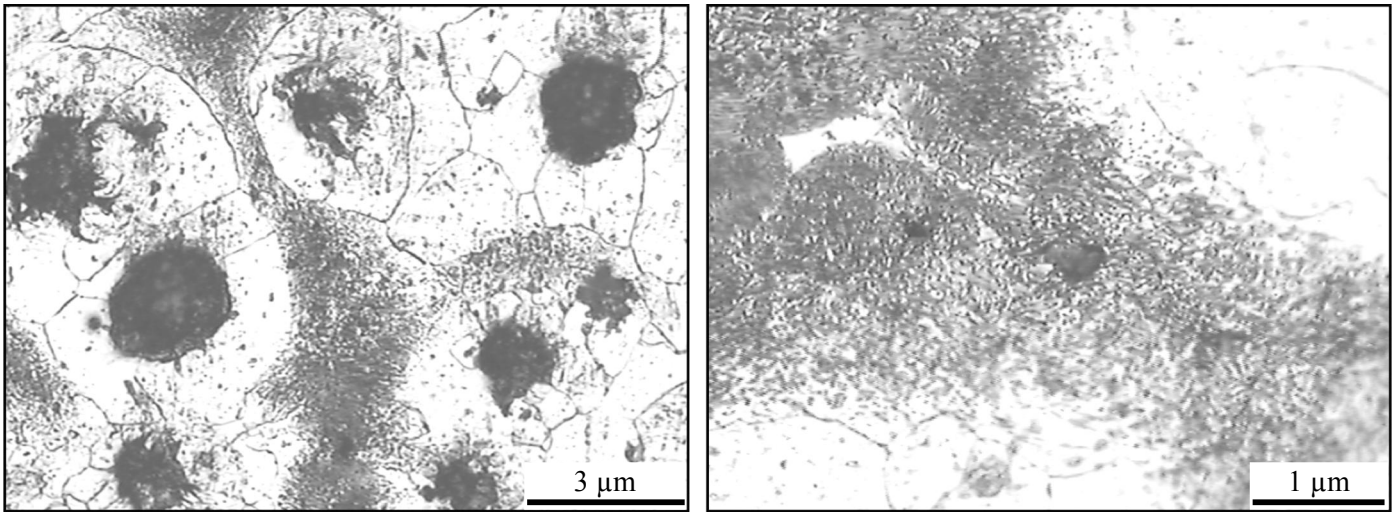


Figure 15: *La fonte GSA à la température 740°C.*

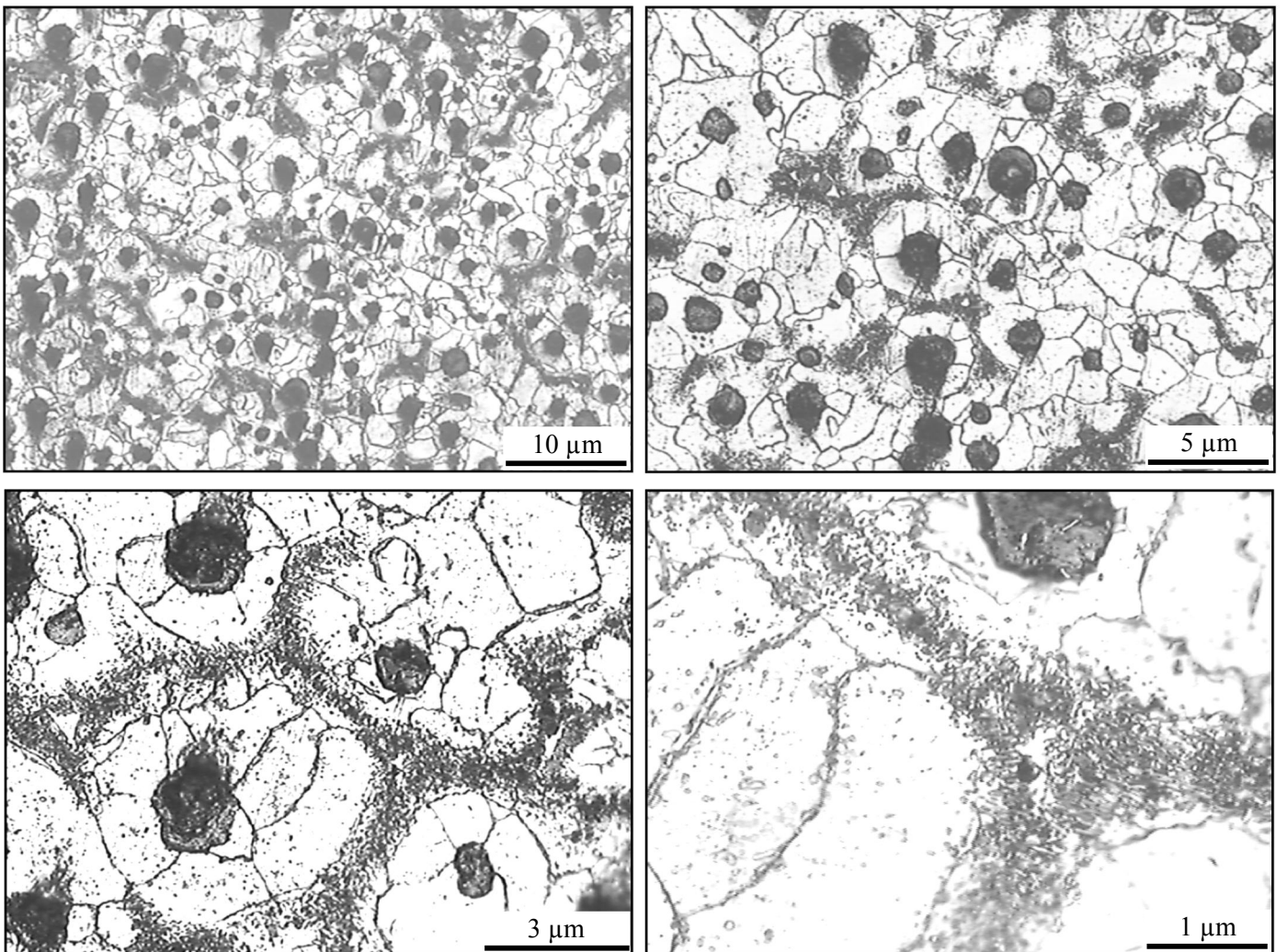


Figure 16: *La fonte GSA à la température 760°C.*

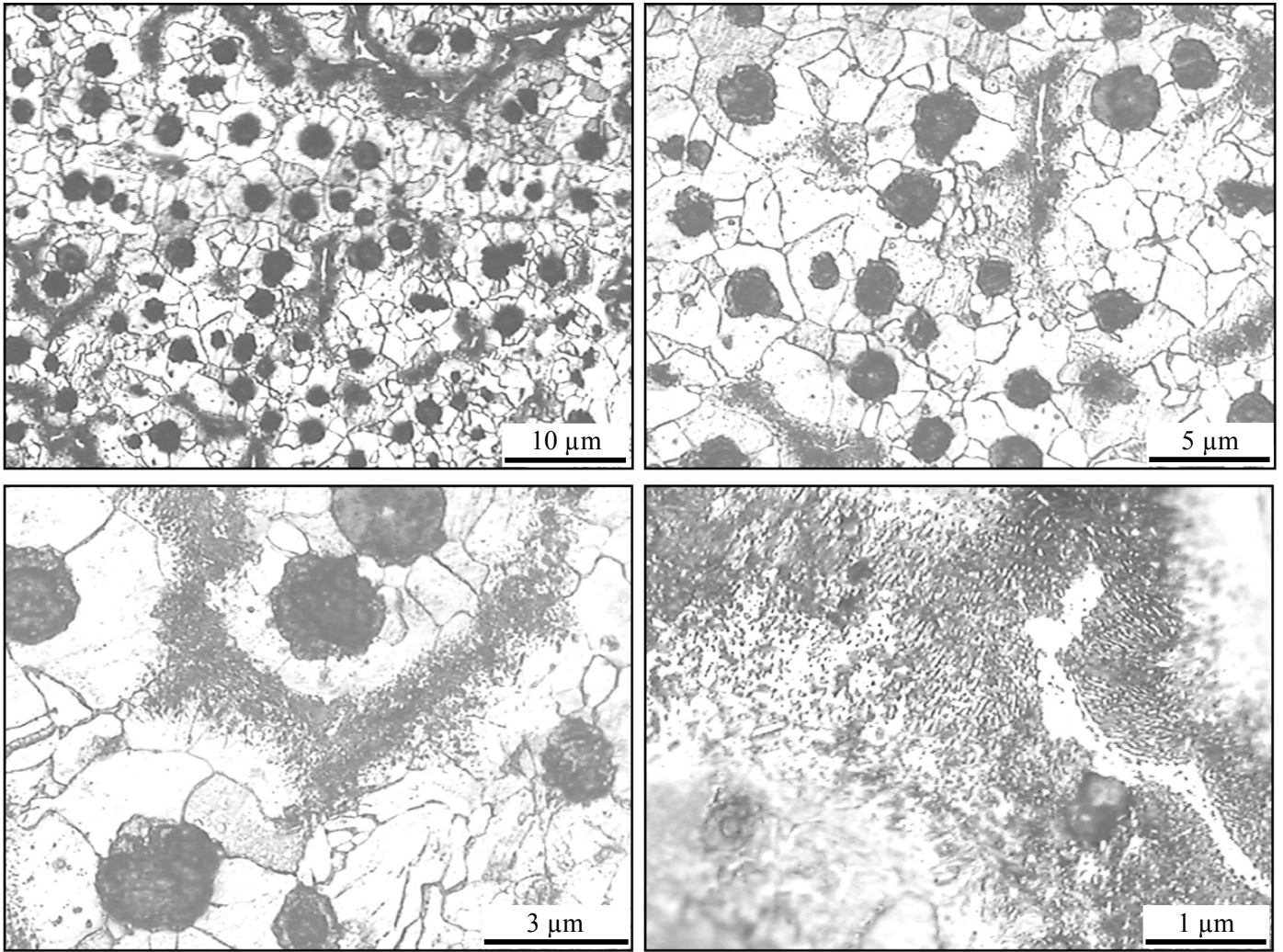
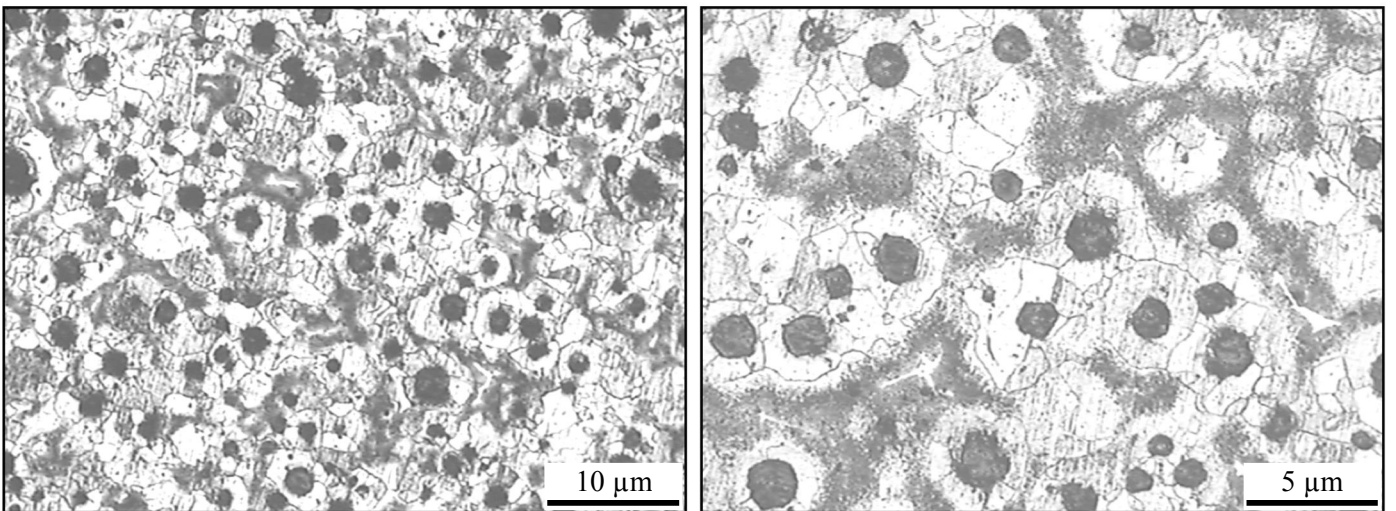


Figure 17: *La fonte GSA à la température 780°C.*



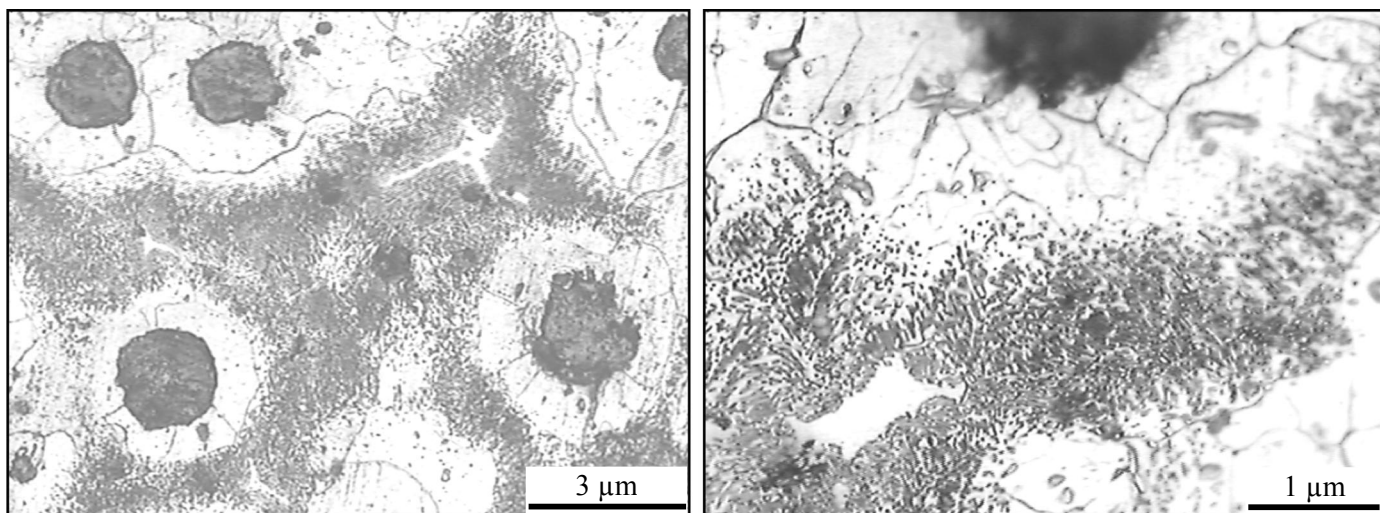


Figure 18: *La fonte GSA à la température 800°C.*

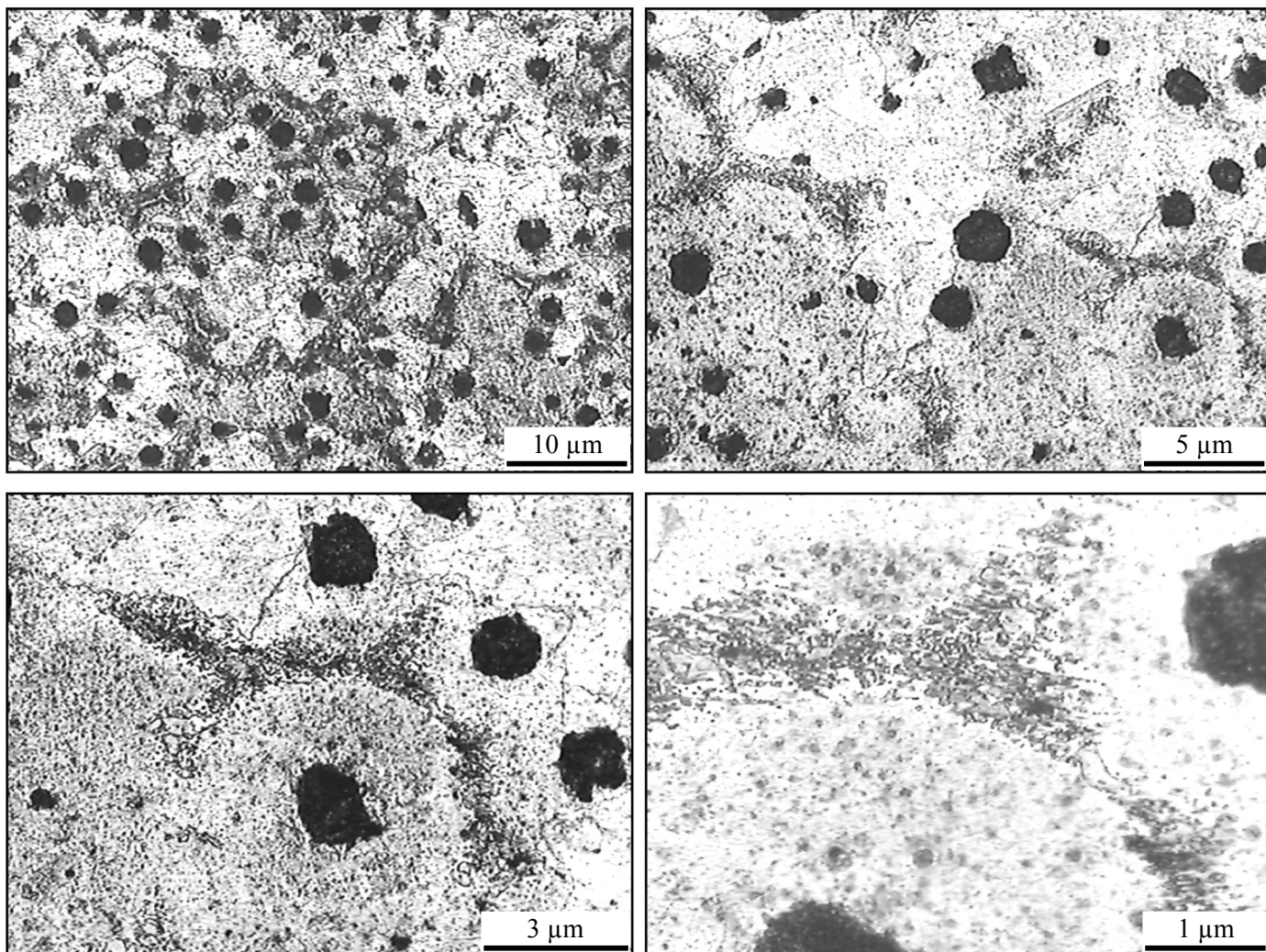


Figure 19: *La fonte GSA à la température 820°C.*

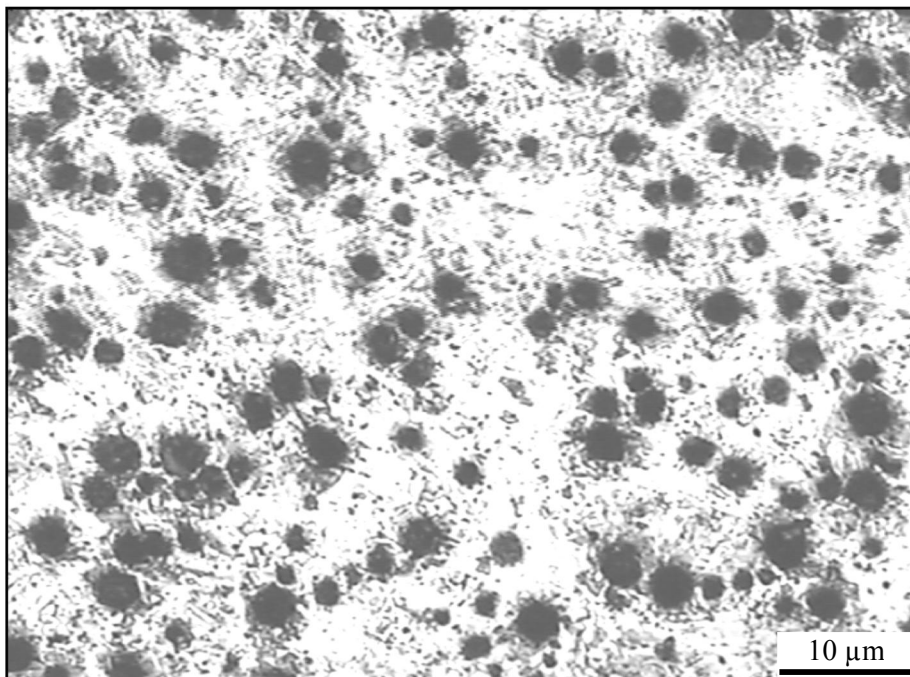
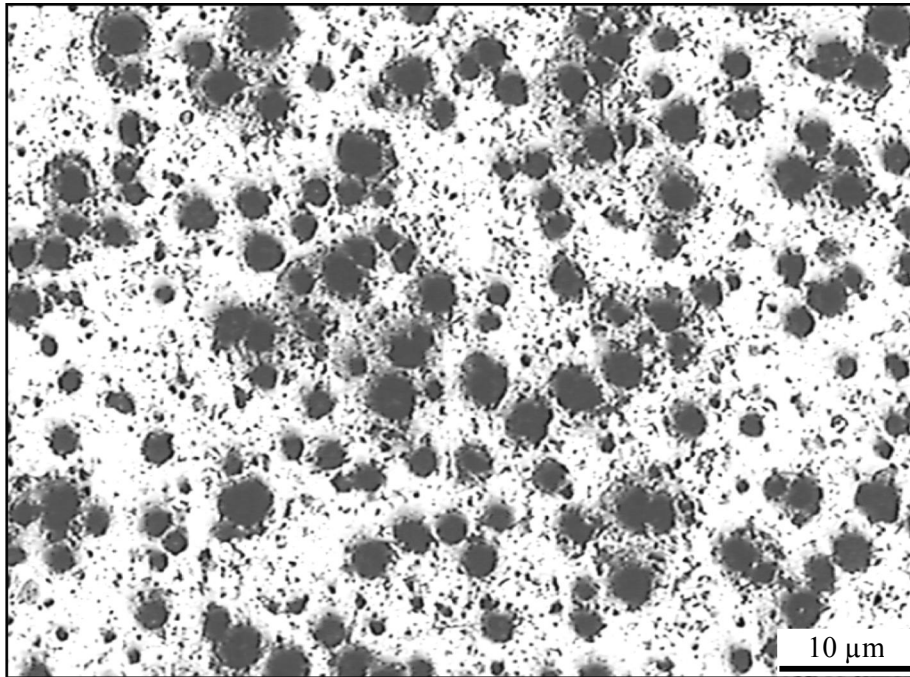


Figure 21: *La fonte GSA à la température 860°C.*