

وزارة التعليم العالي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المكتبة  
BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

20X

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

# THEME

ETUDE DES CARACTERISTIQUES MECANQUES  
DES PHASES D'UNE SOUDURE A L'ARC ELECTRIQUE  
DE LA FGS 38-15 AVEC :

- UNE FONTE GSC
- UN ACIER FAIBLEMENT ALLIE
- UN ACIER INOXYDABLE AUSTENITIQUE

Proposé par :

A. MAISTROOK

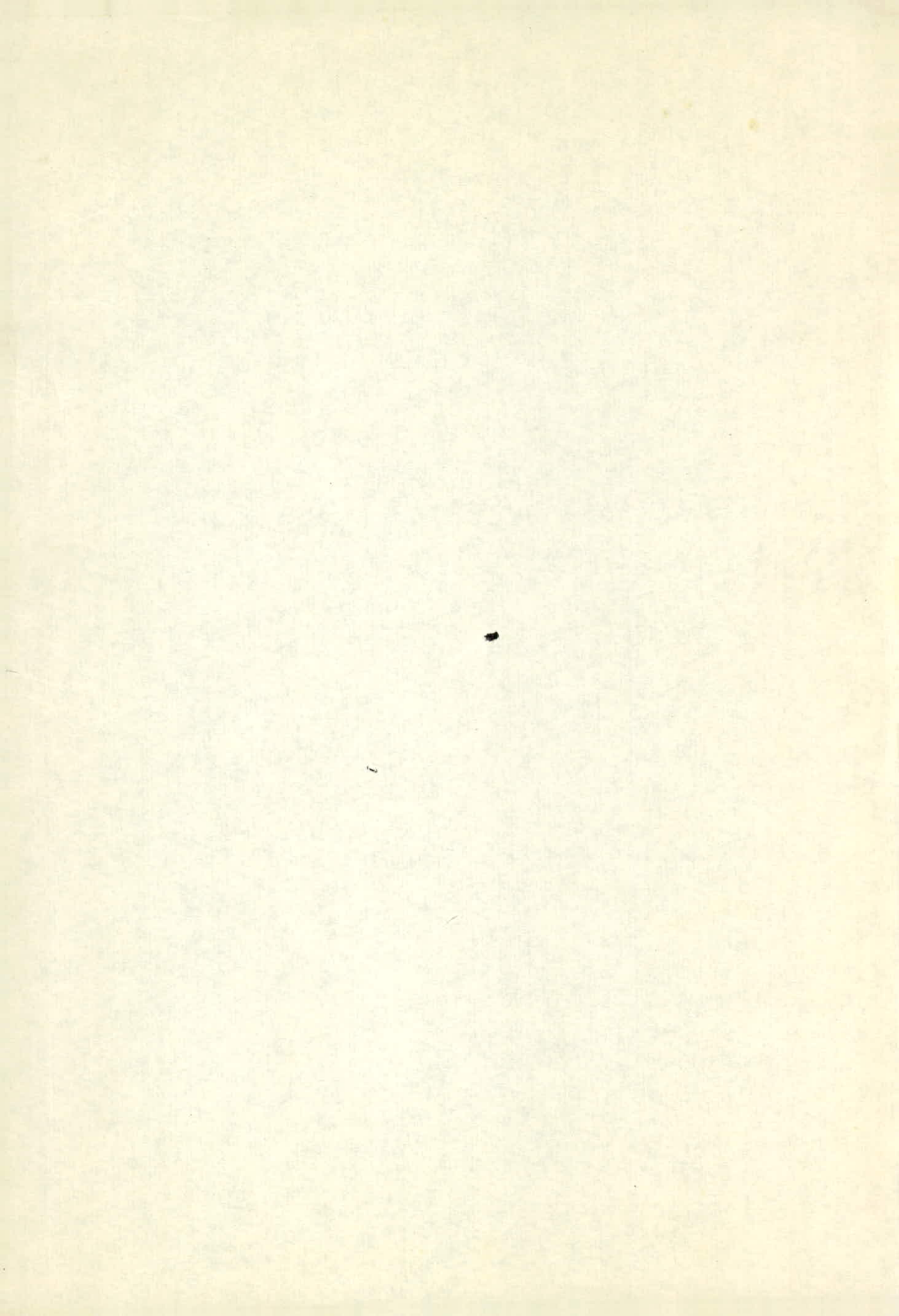
Etudié par :

BENZADI A.  
BOUCHERIT S.

Dirigé par :

E. SALHI  
A. MAISTROOK

PROMOTION JUIN 1988



وزارة التعليم العالي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

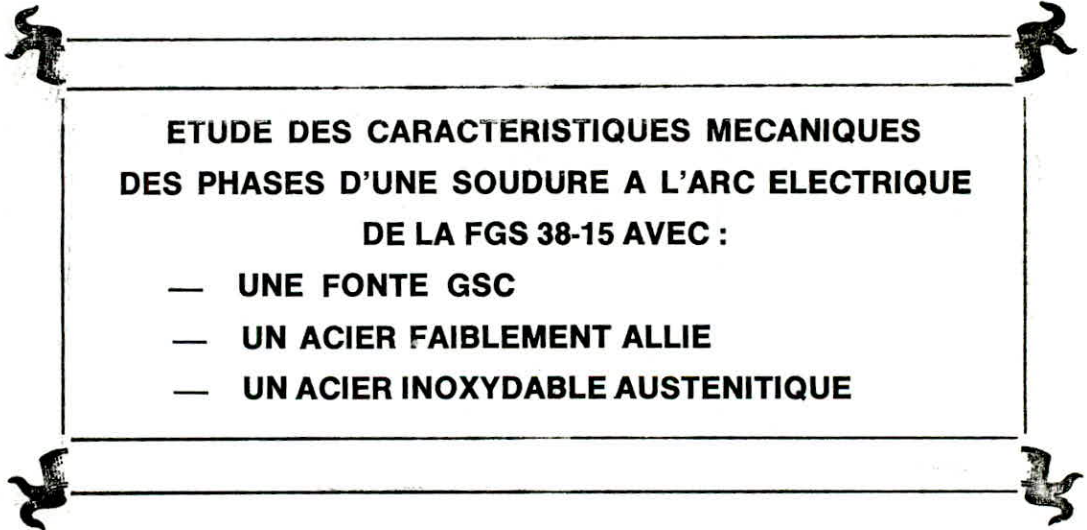
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

# THEME



Proposé par :

A. MAISTROOK

Etudié par :

BENZADI A.

BOUCHERIT S.

Dirigé par :

E. SALHI

A. MAISTROOK

PROMOTION JUIN 1988

-o- D E D I C A C E S -o-  
+++++

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A :

- MON CHER PERE,
- MA CHERE MERE,
- MES CHERS FRERES ET SOEURS,
- MES AMIS.

BOUCHERIT S.

§§§§§§§§§§§§§§§§

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A :

- MON CHER PERE,
- MA CHERE MERE,
- MON PETIT FRERE RIADH
- MA PETITE SOEUR ABLA,
- TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS.

BENZADI A.

-o- R E M E R C I E M E N T S -o-  
+++++

NOUS TENONS A EXPRIMER NOTRE PROFONDE GRATITUDE AU  
PROFESSEUR: MAISTROUK ET AU MAITRE ASSISTANT: SAHLI DE L'E.N.P.  
POUR LEUR PRECIEUSE ASSISTANCE DURANT L'ELABORATION DE CE PROJET.

NOUS REMERCIONS EGALEMENT :

- LE PERSONNEL DU LABORATOIRE MECANIQUE, DE LA FONDERIE ET LE CHEF DE SERVICE "METHODES" (MONTAGE-CAMIONS) DE LA SOCIETE(SNVI-ROUIBA)
- LE PERSONNEL ET LES ENSEIGNANTS DU DEPARTEMENT METALLURGIE.
- CEUX QUI ONT CONTRIBUE A LA REALISATION DE CE MEMOIRE,  
EN PARTICULIER MR. BENZADI ZOUHIR.

BENZADI A. & BOUCHERIT S.

\*\*\*\*\*

-o- S O M M A I R E -o-  
 ++++++

Pages

INTRODUCTION ..... 1

CHAPITRE I : Etude bibliographique sur les fontes GS/

1.1. Généralités sur les fontes à graphite sphéroïdal.. 3

1.2. Elaboration des fontes GS..... 3

1.3. Mécanisme de la graphitisation sphéroïdale..... 4

1.4. Composition chimique..... 7

1.5. Traitements thermiques des fontes GS.....10

1.6. Structures des fontes GS.....12

1.7. Propriétés mécaniques des fontes GS.....12

CHAPITRE II: Le Soudage/

2.1. Historique.....14

2.2. Conception des assemblages soudés.....16

2.3. Procédés de soudage.....19

2.4. Soudage à l'arc électrique.....20

2.5. Les différentes électrodes de soudage.....21

2.6. Les procédés de soudage à l'arc sous atmosphère gazeuse.....24

CHAPITRE III:La soudabilité de la fonte.

3.1. Généralités sur le soudage des fontes.....28

3.2. Les procédés courants de soudage des fontes.à graphite sphéroïdal.....29

3.3. Soudabilité de la fonte à graphite sphéroïdal avec le même métal d'apport.....31

3.4. Soudabilité de la fonte à graphite sphéroïdal avec différents métaux d'apport.....33

CHAPITRE IV : Matériaux étudiés et techniques expérimentales.

4.1. Matériaux étudiés.....	36
4.1.1. Métal de base.....	36
4.1.2. Métal d'apport.....	36
4.1.3. Echantillons et machines à souder.....	37
4.2. Techniques expérimentales.....	40
4.2.1. Traitements thermiques.....	40
4.2.2. Essais mécaniques.....	41

CHAPITRE V : Résultats et commentaires.

5.1. Résultats.....	47
5.2. Commentaires et interprétations des structures....	81
5.3. Commentaires et interprétations des caractéris- tiques mécaniques.....	84

CONCLUSION : .....86

BIBLIOGRAPHIE : .....87

\*\*\*\*\*

-o- INTRODUCTION -o-  
+++++

C'est en 1948 que les savants ont découvert la fonte à graphite sphéroïdal, ce matériau est de plus en plus employé dans l'industrie de fabrication de grosses machines, presses, moteurs Diesel, compresseurs, pompes et turbines à gaz.

Grace aux techniques nouvelles qui ont permis l'amélioration de la résistance et l'allongement de la fonte à graphite sphéroïdal, que celle-ci peut remplacer l'acier dans plusieurs constructions avec une grande satisfaction.

A cause de son utilité et son emploi fréquent, aujourd'hui on ne peut plus se permettre seulement des réparations par soudage, mais aussi des constructions en fonte où la soudure joue un grand rôle.

Il est connu que le procédé de soudage quelque soit sa technique est suivi automatiquement par un changement de la structure cristalline au niveau de la zone thermiquement affectée et du cordon de soudure, ce qui provoque un changement important des caractéristiques mécaniques du matériau.

Les problèmes rencontrés durant l'opération de soudage sont dus au haut pourcentage du carbone que contient ce matériau ce qui nous ramène en général à des caractéristiques mécaniques médiocres ( fragilité, microfissures ).

Malgré ces difficultés on constate aujourd'hui un grand avancement dans l'industrie des constructions en fonte à graphite sphéroïdal, et que les pays industrialisés mettent beaucoup de poids sur le développement des techniques de soudage et à la recherche d'une meilleure compréhension du changement de la structure pendant l'opération de soudage.



C'est dans ce contexte que nous avons donc été amené à orienter notre projet sur l'étude des caractéristiques mécaniques des phases d'une soudure à l'arc électrique de la fonte GSC 38 - 15 (élaborée à L'UFR - SNVI) avec différents métaux d'apport tels que :

- une fonte à graphite sphéroïdal.
- un acier faiblement allié.
- un acier inoxydable austénitique ( 18% de Chrome et 8% de Nickel )

Pour cela, notre plan de travail fut consacré dans un premier chapitre à une étude bibliographique sur les FGS 38 - 15.

Le second, nous a permis également de donner des généralités sur le soudage.

Dans un troisième chapitre, on a mentionné en particulier la soudabilité de la fonte à graphite sphéroïdal.

Le quatrième chapitre sera quant à lui réservé aux matériaux étudiés et techniques expérimentales.

Enfin dans le dernier chapitre nous avons réunis les résultats expérimentaux obtenus accompagnés de leurs interprétations et conclusions.

\*\*\*\*\*

C H A P I T R E - I -  
\*\*\*\*\*

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES FONTES GS.

- 1.1. Généralités sur les fontes GS.
- 1.2. Elaboration des fontes GS.
- 1.3. Mécanisme de la graphitisation sphéroïdale.
- 1.4. Composition chimique.
- 1.5. Traitements thermiques des FGS
- 1.6. Structures des FGS.
- 1.7. Propriétés mécaniques des fontes GS.

### 1.1. - Généralités sur les fontes à graphite sphéroïdale :

C'est en 1948 que les savants ont pu obtenir les fontes à graphite sphéroïdale qui ont des caractéristiques voisines de celles des aciers moulés.

Les fontes à graphite sphéroïdale sont obtenues à partir des fontes grises ordinaires par l'addition dans la poche de coulée de celles-ci certains métaux alcalins ou alcalino-terreux qui provoquent la cristallisation du graphite en sphéroïde.

Les FGS sont constituées d'une matrice métallique ferritique, perlitique ou ferrito-perlitique contenant du graphite. Elles contiennent habituellement des éléments entrant dans la composition chimique de celles-ci tels que :  
Carbone, Silicium, Manganèse, Phosphore, Soufre, Magnésium, Chrome, Nickel et certaines inclusions métalliques.

La composition chimique élémentaire d'une FGS est fixée par le fondeur en fonction de la structure désirée et l'épaisseur de moulage.

### 1.2. - Elaboration des FGS :

On s'intéresse particulièrement dans notre étude à la FGS C 38 - 15 élaborée par l'UFR (SNVI), cette élaboration qui s'effectue selon les étapes suivantes :

- Préparation du lit de fusion
- Fusion de la charge et transfert de la fonte liquide vers les fours à induction.
- Maintien.
- Addition dans la poche de coulée ou de traitement
- Analyse d'un prélèvement
- Coulée et moulage
- Parachèvement.

L'élaboration de la FGS est effectuée dans un four électrique à arc à 3 électrodes de graphite, ce four a une capacité de 10t, une production de 6t/h et une puissance de 21 M V A.

Le lit de fusion est constitué de :

- 60 % de retour de fonderie
- 15 % de chute de tôles
- 20 % de fontes neuves ( Sorel )

Par suite la fonte liquide est transférée au four à induction en raison de la maintenir à l'état liquide à 1500°C.

Une analyse d'un prélèvement d'une médaille est utile pour corriger les écarts à la composition chimique préconisés pour le lit de fusion.

On introduit dans la poche de coulée des alliages blanchissants sphéroïdisants pour permettre la sphéroïdisation du graphite pendant la cristallisation

### 1.3. - Mécanisme de graphitisation sphéroïdale :

L'obtention d'une fonte à graphite sphéroïdale nécessite, sur une fonte potentiellement grise, deux opérations, la première consiste à une addition d'inoculant de graphite ; ( Fe-si ) et la deuxième à une addition de sphéroïdisant du graphite ; (Magnésium) pour cela seize méthodes différentes peuvent être présentées, il en existe d'autres qui sont rarement utilisées, même si l'ordre de présentation est arbitraire.

Actuellement les 5 ou 6 premières resteront probablement d'un usage général.

On s'est basé dans notre étude au traitement Sandwich utilisé pour l'obtention de la FGS, c'est le procédé le plus répandu pour fabriquer la FGS, sa principale qualité est la simplicité.

L'alliage de magnésium est placé au fond de la poche de traitement vide, et l'alliage de la fonte liquide de base est versée par dessus.

La technique de remplissage est quelque peu critique, tel que le jet de liquide doit être dirigé loin de l'alliage et aussi que le remplissage doit être rapide, se sont ces deux facteurs qui augmentent l'efficacité en empêchant l'alliage de flotter en surface et de brûler.

Dans ce cas on utilise une poche de coulée de forme spéciale (fig 1), profonde et présentant une réduction de section vers le fond, la hauteur est  $h \gg 2d$ .

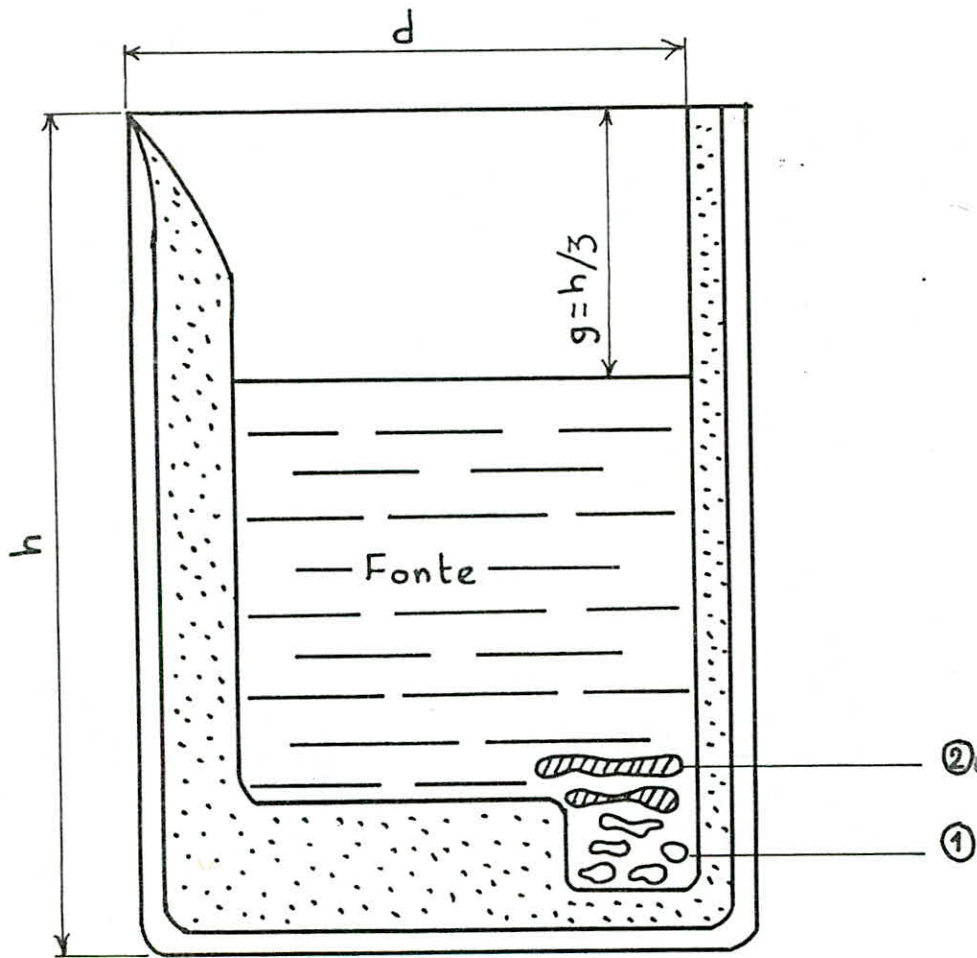
La hauteur de fonte conserve une garde importante pour éviter les projections ( $g = h/3$ )

La poche étant nettoyée on introduit dans la section réduite un " Sandwich " des additions sphéroïdisantes et inoculantes.

Ce Sandwich est recouvert très souvent de toles minces (2 à 3 mm ) en raison de retarder le contact entre la fonte et les alliages de traitements.

La formation du graphite sphéroïdal est liée aux phénomènes de vaporisation du magnésium dans la fonte liquide par la formation de petites bulles vers lesquelles le carbone diffuse, provoquant ainsi la formation d'une sphéroïde de graphite, et la croissance des sphéroïdes s'effectuera en phase déjà solidifiée par migration du carbone diffusant depuis le métal encore liquide jusqu'à la sphéroïde qui au cours de sa croissance nécessite l'existence d'un espace progressivement libéré, ce qui est déterminé par une auto-diffusion des atomes de fer (Fe) dans le sens opposé des atomes de carbone, c'est pour cette raison que le graphite peut perdre sa forme sphéroïdale lors de sa cristallisation.

# Traitement en poche par la méthode "Sandwich"



① Alliage au Mg

② Ferailles légères ou Ferro-Silicium

$$h \approx 1,8 \text{ à } 2 d$$

$$g = \frac{1}{3} h$$

(Fig 1)

#### 1.4. - COMPOSITION chimique.

Les fontes contiennent outre le fer et le carbone certains éléments entrant dans la composition chimique de celle-ci.

##### 1.4.1. Carbone :

Le carbone est un élément graphitisant, c'est en dépendance de l'indice de saturation (  $S = \% C / C_{eq}$  ) que la matrice d'une fonte est dite hypo ou hypereutectique.

Le titre en carbone dans une fonte est compris entre ( 2,8 - 4 % ) il a un rôle favorable, sur la coulabilité et dans l'atténuation des défauts de trempe et de retassure.

Il influe directement sur la quantité de la cémentite, et de la quantité de l'austenite résiduelle.

##### 1.4.2. Silicium : ( T = 1480, Densité = 2,35 )

Le Silicium est un élément graphitisant, il se trouve dans les fontes ordinaires à des taux plus au moins élevés. A l'état dissout dans la ferrite, son rôle graphitisant qui pour des fortes teneurs s'étend même au cémentite protectoïde ou eutectoïde, la matrice de l'alliage.

- Le Si diminue la solubilité du carbone dans le fer.
- Il y a dans une fonte à froid, d'autant plus de graphite que la teneur en Si est plus élevée.
- Il diminue le retrait de la fonte.
- Il affaiblit la résistance mécanique de la fonte.
- Il diminue considérablement la résilience et durcit la ferrite et augmente la résilience de celle-ci dans la fonte.

1.4.3. Manganèse : ( T = 1245°C, densité = 7,45 )

Le manganèse est un élément antigrafitisant, donc carburigène et blanchissant, ce n'est qu'à partir de 0,8 à 1% que le Mn tend à s'opposer à la graphitisation. Quand sa teneur est voisine de 1,5%, il est considéré comme élément d'alliage. Le titre en Mn va de 0,15 à 0,90 %.

Le réseau perlitique accroit avec le titre en MN.

Le Mn est dessulfurant actif et dénitrifiant (les Nitrures sont des éléments perturbateurs de la graphitisation sphéroïdale) Si le titre en N<sub>2</sub> est élevé il faut augmenter la teneur en Mn.

1.4.4. Soufre : ( T = 112°C Densité = 2 )

Le soufre se combine facilement au fer des fontes pour donner le sulfure de Fer - S, il doit être en faibles teneurs en raison de ne pas trop consommer du magnésium (élément dessulfurant couteux)

Une teneur en S de 1 % fait passer de 650° à 100°C la température de commencement de décomposition de la cémentite, et ainsi, le soufre diminue la coulabilité de la fonte, il freine la décomposition de la perlite, comme il diminue le nombre de lamelles de graphite des fontes grises, et il laisse subsister une certaine tendance aux soufflures, de ce fait le soufre est limité à un maximum de (0,015)

1.4.5. Phosphore : ( T = 610°C, densité = 2,33 )

Le phosphore est un élément grafitisant qui entre en solution solide dans les fontes, formant ainsi des phosphures métalliques.

Il forme : avec le fer un eutectique phosphoreux binaire Fe<sub>3</sub> P - Fe appelé " Steadité " qui fond à 1050°C environ, et avec le fer et la cémentite un eutectique phosphoreux ternaire Fe<sub>3</sub> P - Fe<sub>3</sub> C - P dont la température de fusion est voisine de 950°C.



#### 1.4.3. Manganèse : ( T = 1245°C, densité = 7,45 )

Le manganèse est un élément antigrafitisant, donc carburigène et blanchissant, ce n'est qu'à partir de 0,8 à 1% que le Mn tend à s'opposer à la graphitisation. Quand sa teneur est voisine de 1,5%, il est considéré comme élément d'alliage. Le titre en Mn va de 0,15 à 0,90 %.

Le réseau perlitique accroit avec le titre en MN.

Le Mn est dessulfurant actif et dénitruant (les Nitrures sont des éléments perturbateurs de la graphitisation sphéroïdale) Si le titre en N<sub>2</sub> est élevé il faut augmenter la teneur en Mn.

#### 1.4.4. Soufre : ( T = 112°C Densité = 2 )

Le soufre se combine facilement au fer des fontes pour donner le sulfure de Fer - S, il doit être en faibles teneurs en raison de ne pas trop consommer du magnésium (élément dessulfurant couteux)

Une teneur en S de 1 % fait passer de 650° à 100°C la température de commencement de décomposition de la cémentite, et ainsi, le soufre diminue la coulabilité de la fonte, il freine la décomposition de la perlite, comme il diminue le nombre de lamelles de graphite des fontes grises, et il laisse subsister une certaine tendance aux soufflures, de ce fait le soufre est limité à un maximum de (0,015)

#### 1.4.5. Phosphore : ( T = 610°C, densité = 2,33 )

Le phosphore est un élément graphitisant qui entre en solution solide dans les fontes, formant ainsi des phosphures métalliques.

Il forme : avec le fer un eutectique phosphoreux binaire Fe<sub>3</sub> P - Fe appelé " Steadité " qui fond à 1050°C environ, et avec le fer et la cémentite un eutectique phosphoreux ternaire Fe<sub>3</sub> P - Fe<sub>3</sub> C - P dont la température de fusion est voisine de 950°C.

1.4.3. Manganèse : ( T = 1245°C, densité = 7,45 )

Le manganèse est un élément antigraphitisant, donc carburigène et blanchissant, ce n'est qu'à partir de 0,8 à 1% que le Mn tend à s'opposer à la graphitisation. Quand sa teneur est voisine de 1,5%?, il est considéré comme élément d'alliage. Le titre en Mn va de 0,15 à 0,90 %.

Le réseau perlitique accroit avec le titre en MN.

Le Mn est dessulfurant actif et dénitruant (les Nitrures sont des éléments perturbateurs de la graphitisation sphéroïdale) Si le titre en N<sub>2</sub> est élevé il faut augmenter la teneur en Mn.

1.4.4. Soufre : ( T = 112°C Densité = 2 )

Le soufre se combine facilement au fer des fontes pour donner le sulfure de Fer - S, il doit être en faibles teneurs en raison de ne pas trop consommer du magnésium (élément dessulfurant couteux)

Une teneur en S de 1 % fait passer de 650° à 100°C la température de commencement de décomposition de la cémentite, et ainsi, le soufre diminue la coulabilité de la fonte, il freine la décomposition de la perlite, comme il diminue le nombre de lamelles de graphite des fontes grises, et il laisse subsister une certaine tendance aux soufflures, de ce fait le soufre est limité à un maximum de (0,015)

1.4.5. Phosphore : ( T = 610°C, densité = 2,33 )

Le phosphore est un élément graphitisant qui entre en solution solide dans les fontes, formant ainsi des phosphures métalliques.

Il forme : avec le fer un eutectique phosphoreux binaire Fe<sub>3</sub> P - Fe appelé " Steadité " qui fond à 1050°C environ, et avec le fer et la cémentite un eutectique phosphoreux ternaire Fe<sub>3</sub> P - Fe<sub>3</sub> C - P dont la température de fusion est voisine de 950°C.

l'eutectique phosphoreux, qui est, dans les fontes, réparti le plus généralement en plages séparées, est caractérisé par :

- Une température de fusion relativement basse 950°C environ, une très grande dureté et fragilité et un coefficient de dilatation relativement élevé

En conséquence le Phosphore a sur les fontes respectivement les effets suivants :

- Il abaisse la température de fin de solidification de la fonte, il améliore de ce fait sa coulabilité.
- Il rend fragiles et cassantes les pièces moulées, lesquelles sont alors très sensibles aux chocs.
- Il augmente le phénomène de dilatation.
- Le Phosphore tout comme le Silicium a pour effet de modifier le diagramme de solidification des fontes, il déplace le point eutectique vers l'origine des carbones.
- Il fragilise les joints de grains et provoque une rupture intergranulaire.

Le titre en Phosphore dans les fontes est limité à un maximum de 0,10 %.

#### 1.4.6. Magnésium :

Le Magnésium est un élément blanchissant et sphérolisant du graphite, le titre en magnésium dans une fonte dépend de l'épaisseur de la pièce moulée (0,01 à 0,10 % Mg ), il faut éviter les grandes teneurs en Mg lorsqu'on recherche la structure ferritique brute de coulée.

Le Magnésium total est donné par :

$$\text{Mg} = \text{Mg lié au S}(\text{Mg S}) + \text{Mg dissout ( Seul actif )}$$

Certains métaux peuvent rester en émulsion dans la fonte fluide, et se fixer sur les particules solides en suspension, ce qui les neutralise et contribue à isoler les germes nocifs, de ce fait le rôle du Mg consiste à l'élimination de tout germe nocif par réduction, désulfuration et épuration.

Sa tension de vapeur est plus suffisante pour le maintient des bulles à la température de solidification.

#### 1.4.7. Impuretés :

Certains éléments sont formellement à proscrire :

As, Bi, Pb, Se, Te, Ti, l'étain stabilisateur de la perlite est limité à 0,02 % dans la FGS 38 -15

Certains d'entre eux comme étant des impuretés nocives ont pour effet de dégénérer la forme du graphite déchiqueté, de pseudo-lamelles ou bien même des lamelles.

#### 1.5. Traitements thermiques des fontes.

Les traitements thermiques consistent d'homogénéiser la structure micrographique sans modifier la macrostructure, ils permettent d'améliorer certaines propriétés qui peuvent être mécaniques, physiques ou thermiques ce qui conduit à l'élimination des contraintes internes pour une meilleure stabilité dimensionnelle, et ainsi l'obtention de la structure voulue.

En outre les fontes GS présentent une excellente aptitude aux traitements thermiques.

Les différents traitements thermiques appliqués aux fontes sont les suivants :

##### 1.5.1. Recuit de ferritisation (adoucissement)

On vise par ce traitement l'obtention d'une structure ferritique, c.a.d de transformer la perlite de la structure (ferrito-perlitique) en ferrite, ce traitement assure à la ductilité et l'usinabilité maximale.

Pour cela deux méthodes peuvent être appliquées :

La première consiste à un chauffage à une température de l'ordre de 690 à 740°C, avec un maintien de 4 à 5 heures permettant la graphitisation de la perlite, ensuite on effectue un refroidissement dans le four.

la deuxième consiste à un chauffage jusqu'à la température 875°C avec maintien de 30 à 60 mn puis un refroidissement lent.

#### 1.5.2. Stabilisation (Relaxation de contraintes)

Le traitement de stabilisation permet d'atténuer des contraintes qui provoquent des ruptures en service.

Cette relaxation consiste à un chauffage à une température de 500°C à 650°C (température située au dessous du palier AC1, puis un maintien de 2 à 5 heures, il sera suivi d'un refroidissement suffisamment lent (60°C/Heure) pour éviter la création des contraintes une autre fois.

#### 1.5.3. Normalisation :

Ce traitement a pour but de rendre la structure entièrement perlitique lamellaire qui est caractérisée par une grande résistance à la traction.

La normalisation est exécutée en chauffant la pièce à une température se situant au dessus de palier AC1 (850 à 900°C), puis un maintien à cette température, ensuite un refroidissement à l'air agité.

#### 1.5.4. Trempe et revenu :

Ce traitement permet d'avoir une matrice martensitique qui est caractérisée par sa grande dureté allant jusqu'à 500 HB.

Le traitement consiste en un chauffage à une température comprise entre 850° à 925°C, et le maintien à cette température pendant 30 à 60 mn puis un refroidissement rapide dans l'huile.

On obtient ainsi une structure composée de Martensité et Austénite résiduelle. Et en raison de diminuer la fragilité de la structure martensitique, et d'atténuer les contraintes internes. Un revenu à basse température est recommandé, et il consiste à un chauffage à une température située au dessus de A1, puis un maintien à cette température pendant 1 heure, et enfin un refroidissement à l'air calme.

#### 1.6 - STRUCTURES DES FONTES GS :

Les fontes GS sont constituées à l'état brut de coulée d'une matrice métallique ferritique, ferrito-perlitique ou perlitique avec cémentite contenant du graphite.

D'autres matrices peuvent également apparaître sous l'effet d'un traitement thermique ou d'une addition des éléments d'alliage. Ainsi on peut obtenir des matrices martensitiques, sorbitiques, troostitiques et perlitiques globulaires.

#### 1.7 - PROPRIETES MECANIQUES DES FONTES GS :

Les fontes grises à graphite sphéroïdale sont caractérisées par :

- Une aptitude aux traitements thermiques comparables à celle des aciers à haut carbone.

- Une grande résistance à l'usure par frottement assuré par le graphite, celui-ci comme étant un autolubrifiant, fait diminuer les risques de jonction intermétallique (grippage).

Des caractéristiques de résistance et d'allongement voisines à celles de l'acier pour une forme bien sphéroïdale du graphite. En effet la norme (NF 32-201) donne les valeurs des caractéristiques mécaniques pour quelques nuances de la fonte GS.

NCE	Résistance à la traction (dan/mm <sup>2</sup> )	A %	Limite d'élasticité à 0,2% Re (dan/mm <sup>2</sup> )	Résilience (Daj/cm <sup>2</sup> )	Dureté ( HB )
. 2	68,6 - 80	5-2	46,1 - 60	0,8 - 0,3	240-310
. 2	58,8 - 75	6-2	39,2 - 55	1 - 0,4	230-280
. 7	49 - 65	10-7	34,3 - 52	1,5 - 0,5	210-260
. 12	41,2 - 55	18-12	27,4 - 45	2,8 - 1,3	≤ 220
. 15	37,2 - 50	25-15	23,5 - 38	3 - 1,7	≤ 280

CHAPITRE - II  
\*\*\*\*\*

II - Le SOUDAGE

2.1. Historique

2.2. Conception des assemblages soudés

2.3. Les procédés de soudage

2.4. La soudure à l'arc électrique

2.5. Les différentes électrodes de soudage

2.6. Les procédés de soudage à l'arc sous atmosphère gazeuse



## II - LE SOUDAGE.

### 2.1. HISTORIQUE :

Il est important, pour bien saisir l'évolution et le développement d'une profession, d'en connaître l'historique; le cheminement de pensée des créateurs à valeur d'exemple.

Bien qu'on fasse remonter à quelques centaines de millénaires l'apparition de l'espèce humaine, il est remarquable que l'art du travail des métaux n'est apparu qu'au 8ème millénaire avant notre ère. C'est simultanément sans doute que le soudage est apparu : soudage à la poche pour bronze, soudage à la forge pour fer, procédés qui rejoignent les modes d'élaboration. L'art de souder selon ces procédés archaïques inchangés s'est perpétué à travers l'antiquité, le moyen âge, et le temps moderne. Son emploi décroît dans la mesure où, par leur progrès les assemblages mécaniques prévalurent.

L'application et le perfectionnement successif de grandes inventions aboutissant à la création de source nouvelles a progressivement, à partir de la fin du 19ème siècle recréé complètement l'art du soudage, dont les procédés anciens, issus de la plus haute antiquité et renouvelés jusqu'alors étaient tombés en désuétude. Les premiers hommes qui sûrent mettre en oeuvre les métaux ne disposèrent comme moyens d'assemblages que des modes rudimentaires de soudage que furent le soudage à la forge. Ils pratiquèrent également le brasage.

Ces procédés conservés à peu près inchangés jusqu'au milieu du 19ème siècle.

Dans la seconde moitié du 19ème siècle, le procédé de soudage à la forge s'est perfectionné et a donné lieu à certaines spécialisations très productrices.

Dans le même temps, les procédés électriques à l'arc et par résistance ont été inventés. Ils étaient les premiers pas vers les procédés modernes de soudage à haute énergie spécifique, mais furent peu utilisés en raison du peu de développement de l'électricité et de leur forme rudimentaire.

Entre 1905 et 1930, fut le moyen universel moderne de soudage. A partir de 1925 les procédés de soudage électrique par résistance et le soudage à l'arc se sont confirmés et développés supplantant peu à peu le soudage oxyacétylénique et permettant respectivement les fabrications de series et la production de grands ensembles. Après la dernière guerre, soit à partir de 1950, une multitude de procédés nouveaux, nés des derniers progrès scientifiques et techniques, ont apporté leurs particularités propres. L'ensemble de ces moyens a permis de développer à l'extrême les applications du soudage dans tous les domaines où intervient l'emploi du métal.

## 2.2. La conception des assemblages soudés :

### 2.2.1. Généralités :

La conception des assemblages soudés doit être telle que les différents assemblages qui les composent remplissent correctement les conditions de service imposées, pour un coût de réalisation le plus faible possible et dans le respect des hypothèses de calcul qui ont permis de déterminer leur dimensionnement.

### 2.2.2. Types d'assemblages.

Les principaux types d'assemblages destinés à être soudés sont classifiés dans le tableau : N°-1 par une représentation symbolique des soudures suivant la norme NFE 04 - 020

### 2.2.3. Les différentes zones d'un assemblage soudé.

Il existe en effet, entre une soudure et une brasure, une différence fondamentale: une soudure est un assemblage dans lequel les métaux des pièces assemblées participent directement à la formation du joint. Au contraire, dans une brasure les métaux assemblés ne participent qu'indirectement à la formation du joint, c'est un autre métal doté d'une température de fusion plus basse qui, fondu en une seule opération, diffuse dans les surfaces assemblées et assure en se solidifiant une liaison métallique entre ces dernières.

Donc, dans une soudure, le profil des surfaces assemblées est modifié en cours d'exécution ; dans une brasure, les pièces conservent intégralement leur profil initial.

Dans un assemblage soudé on distingue les zones suivantes : ( fig:2-b )

- Métal de base (MB) : métal des pièces à assembler. Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou dissemblables.
- Métal d'apport : c'est le métal que l'on ajoute par fusion au joint à réaliser ; la masse du métal d'apport ainsi ajoutée se nomme métal déposé.

- Bain de fusion : le bain de fusion est formé de métal de base et de métal d'apport. Le métal composant le bain de fusion prend, après solidification, le nom de métal fondu et le volume qu'il occupe est nommé zone fondue.

- Zone thermiquement affectée ( ZAT ) : c'est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dans les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées par la chaleur de soudage.

- Zone de liaison : zone marquant la frontière entre la zone fondue et la zone thermiquement affectée ; en quelque sorte c'est la limite entre le métal qui a été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté solide au cours de l'opération de soudage.( fig. 1b)



en V



en U



en tulipe



en V avec méplat



en Y



en J ou en demi tulipe



en demi V



en X



en X avec méplat



en X dissymétrique

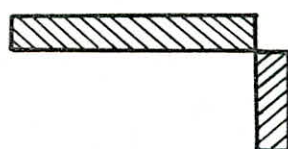


en K

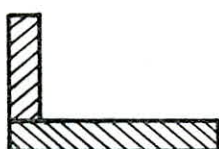


en double tulipe

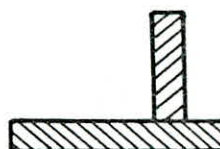
ASSEMBLAGES BOUT À BOUT SUR BORDS CHANFREINÉS



angle extérieur



angle intérieur



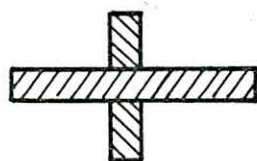
à 2 éléments



à 3 éléments

ASSEMBLAGES D'ANGLE

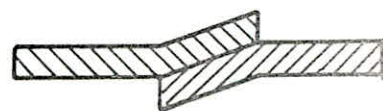
ASSEMBLAGES EN TÉ



ASSEMBLAGE EN CROIX



droit



oblique

ASSEMBLAGE A RECOUVREMENT

TABLEAU N°1 TYPES D'ASSEMBLAGES SOUDÉS

### 2.3. Les procédés de soudage :

Le tableau ci-dessous montre un exemple de classement suivant les principales sources d'énergie.

Nature de l'énergie	Nomenclature des procédés
Thermochimique	Soudage aluminothermique Soudage oxyacétylénique
Électrique	Soudage manuel avec électrodes enrobées Soudage sous protection gazeuse avec           électrode réfractaire TIG électrode fusible MIG et MAG Soudage sous flux solide Soudage par plasma d'arc Soudage des goujons
	Soudage par points Soudage à la molette Soudage par bossage Soudage en bout par étincelage Soudage vertical sous laitier Soudage par induction
Mécanique	Soudage par friction Soudage par explosion Soudage par ultra sons Soudage par diffusion sous pression statique
Focalisée	Soudage par bombardement électronique Soudage par laser

## 2.4. La soudure à l'arc électrique :

### 2.4.1. Principe :

Lorsqu'on coupe un conducteur électrique, il se produit, à l'endroit de la rupture, un arc lumineux dont la température est très élevée et peut dépasser 3000°C. L'étincelle ou la lueur ainsi produite et qui prend le nom " d'arc ", à cause de sa forme, est capable de fondre et de désagréger partiellement les conducteurs dont elle est issue et les particules obtenues se déposent de préférence sur le conducteur le plus froid ou sur celui qui, des deux, a plus forte masse.

On peut obtenir de plusieurs façons le résultat cherché : soit en faisant éclater un arc entre deux électrodes de carbone et en fondant les bords à souder avec cet arc, soit en faisant jaillir l'arc entre une électrode de carbone et la pièce à souder, soit enfin on fait aboutir l'un des conducteurs à une électrode métallique.

L'arc jaillit alors entre l'extrémité de cette électrode et la pièce, et le métal de l'électrode se trouve fondu et déposé sur les parties à souder. C'est ce dernier procédé de soudure à l'arc à électrodes métalliques qui est le plus répandu et qui, fera principalement l'objet de notre étude.

### 2.4.2. Nature de courant :

La soudure électrique à l'arc peut s'exécuter avec toutes les formes de courants : continu ou alternatif.

Il est généralement plus facile d'amorcer l'arc quand on utilise de courant continu ; de même cet arc est plus aisément maintenu même si sa longueur varie.

Le courant alternatif, au contraire, rend l'amorçage plus difficile et oblige le soudeur à maintenir une distance faible et toujours égale entre l'extrémité de l'électrode et la pièce.

On voit que les deux formes de courant peuvent présenter des avantages et des inconvénients et que, par conséquent, le choix doit être dicté par des considérations techniques et pratiques sérieuses qui exigent de l'utilisateur une connaissance approfondie du soudage à l'arc.

## 2.5. Les différentes électrodes de soudage

On distingue deux types d'électrodes :

### - Électrodes nues :

Les électrodes nues sont constituées par simple baguette métallique de composition appropriée à celle du métal de base. A l'heure actuelle, elles ne sont pratiquement plus employées.

Elle ne peuvent être utilisées qu'en courant continu, car en alternatif l'amorçage et le maintien de l'arc seraient trop difficiles, sinon impossibles.

### - Électrodes enrobées :

Composées d'un fil métallique (âme) et d'une gaine de produit enrobant le fil ( enrobage). Voir fig 1a.

#### 2.5.1. Rôle et nature de l'enrobage :

##### - Rôle de l'enrobage :

- Rôle électrique par les silicates, carbonates de Na et K qui favorisent l'amorçage et stabilité de l'arc.

- Rôle mécanique et physique avec la propulsion du métal par les gaz du cratère de l'électrode vers les pièces.

- Rôle métallurgique par la protection du métal en fusion pendant son refroidissement. Par la réaction chimique avec le laitier qui affine le bain. Par l'apport d'élément d'alliage pour constituer un métal de composition donnés ( électrode synthétique ).

Action bénéfique du laitier sur les propriétés mécaniques du dépôt par élimination du soufre et du phosphore.

Très hygroscopique doit être séché 2 heures à 350°C avant l'emploi.

Excellente résistance à la fissuration à chaud et à froid.

Son laitier visqueux permet le soudage en toutes position.



Nature cellulosique ( symbole C ) :

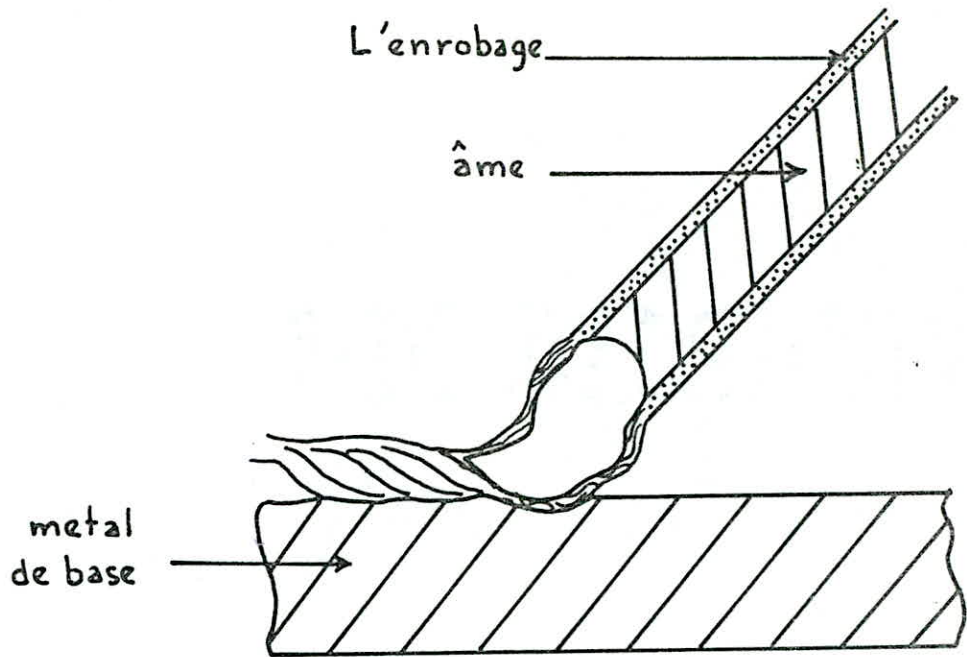
Contient de la cellulose dégageant un volume important de gaz reducteur. Sa forte teneur en hydrogène augmente la chaleur dégagée par l'arc d'où la forte pénétration de la zone fondue. Utilisation intéressante pour une passe en fond de chanfrein et pour un soudage rapide en position descendante.

Nature Rutile ( symbole B ) :

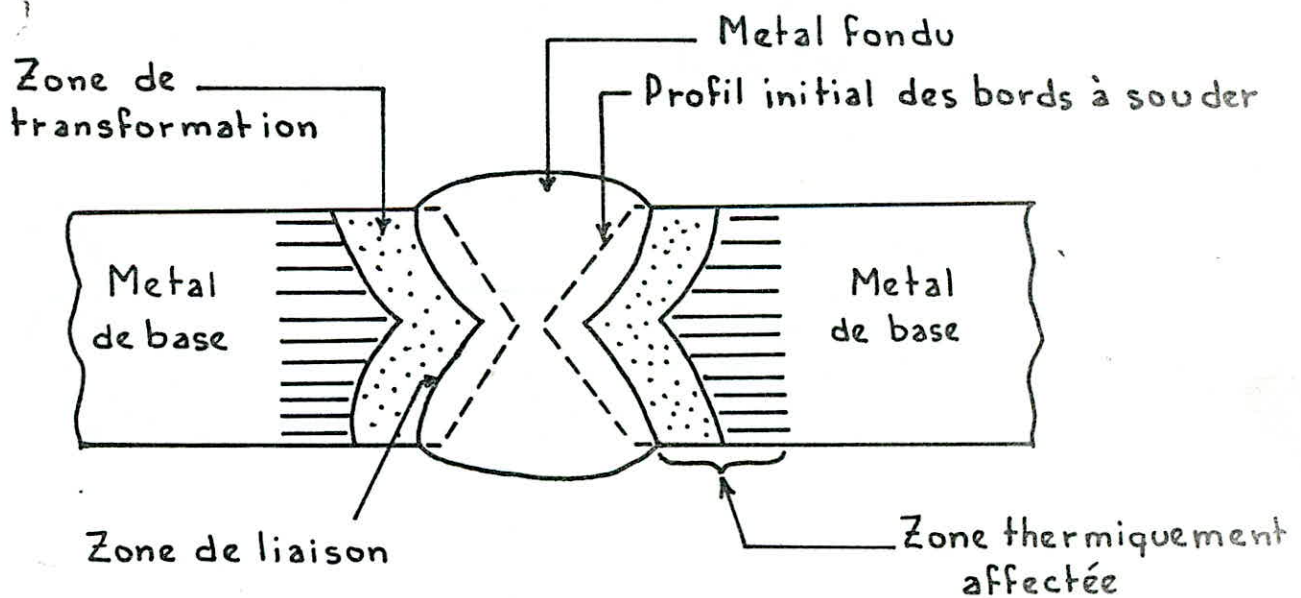
Le rutile est de l'oxyde de titane, le métal fondu est calmé, donc sans dégagement gazeux pendant sa solidification.

Nature Acide ( symbole A ) :

A base de silicate de potassium (acide) stabilisant l'arc. Ces électrodes sont à bas prix, produisant des soudures appropriées pour des travaux très ordinaires. Elles sont actuellement peu utilisées.



( Fig1a ) Schéma d'une électrode enrobée



( Fig1b ) Les différentes zones d'un assemblage soudé

## 2.6. Les procédés de soudage à l'arc sous atmosphère gazeuse :

Trois types d'application sont généralement utilisés :

- L'arc jaillit entre une électrode réfractaire et la pièce. C'est le procédé TIG, le gaz inerte protège l'électrode et le métal fondu.

- L'arc jaillit entre un fil fournissant le métal d'apport et la pièce, c'est le procédé MIG.

- Le fil fournit le métal d'apport, mais le gaz est actif, c'est le procédé MAG.

### 2.6.1. Soudage à l'arc électrique sous atmosphère d'argon (MIG et TIG) :

#### Historique :

La naissance du soudage à l'argon est intimement liée au développement de la construction aéronautique.

C'est en effet dans le but de résoudre le problème de soudage des alliages ultra-légers à base de magnésium, utilisés dans ce domaine, qu'entre 1940 et 1942 les fabricants américains de ces alliages, en collaboration avec les constructeurs d'avions, étudièrent et mirent au point le procédé de soudage sous protection de gaz inerte, lequel s'est étendu depuis lors à de nombreux métaux et alliages.

#### Principe :

Le principe du procédé est basé à l'origine sur l'emploi d'un arc électrique jaillissant entre une électrode de tungstène, d'une part, et la ou les pièces à souder, d'autre part. Cet arc est entouré d'un jet de gaz inerte très pur. Lorsque l'assemblage nécessite un métal d'apport, celui-ci est fourni par une baguette indépendante. (voir fig. 1C)

Une variante du procédé, dans laquelle l'arc s'établit entre une électrode d'apport, donc consommable et la pièce à souder. (voir fig. 1D)

## 2.6.2. Soudage à l'arc électrique sous atmosphère d'un gaz actif (MAG) :

### Principe :

Le principe de soudage est le même que celui du soudage (MIG), mais la seule différence, l'atmosphère de base est le CO<sub>2</sub>.

Ce procédé est uniquement utilisé pour le soudage des aciers non ou faiblement alliés.

## 2.6.3. Gaz protecteurs :

### - Gaz inertes :

#### - Argon pur :

.Pureté 99,995% pour le soudage de haute qualité sur Aluminium et Alliages.

.Pureté 99,99% pour le soudage des aciers inoxydables, du cuivre, des alliages légers.

#### - Argon + Hélium :

Le mélange améliore la pénétration pour le soudage des aciers inoxydables. Il permet en soudage automatique une plus grande vitesse et une meilleure stabilité de l'arc.

#### - Argon + Hélium + Hydrogène :

Le mélange augmente la tension de l'arc, il permet une plus grande vitesse de soudage.

### Gaz actifs :

Gaz carbonique, il protège efficacement le bain. De chaleur volumique élevée, il refroidit rapidement.

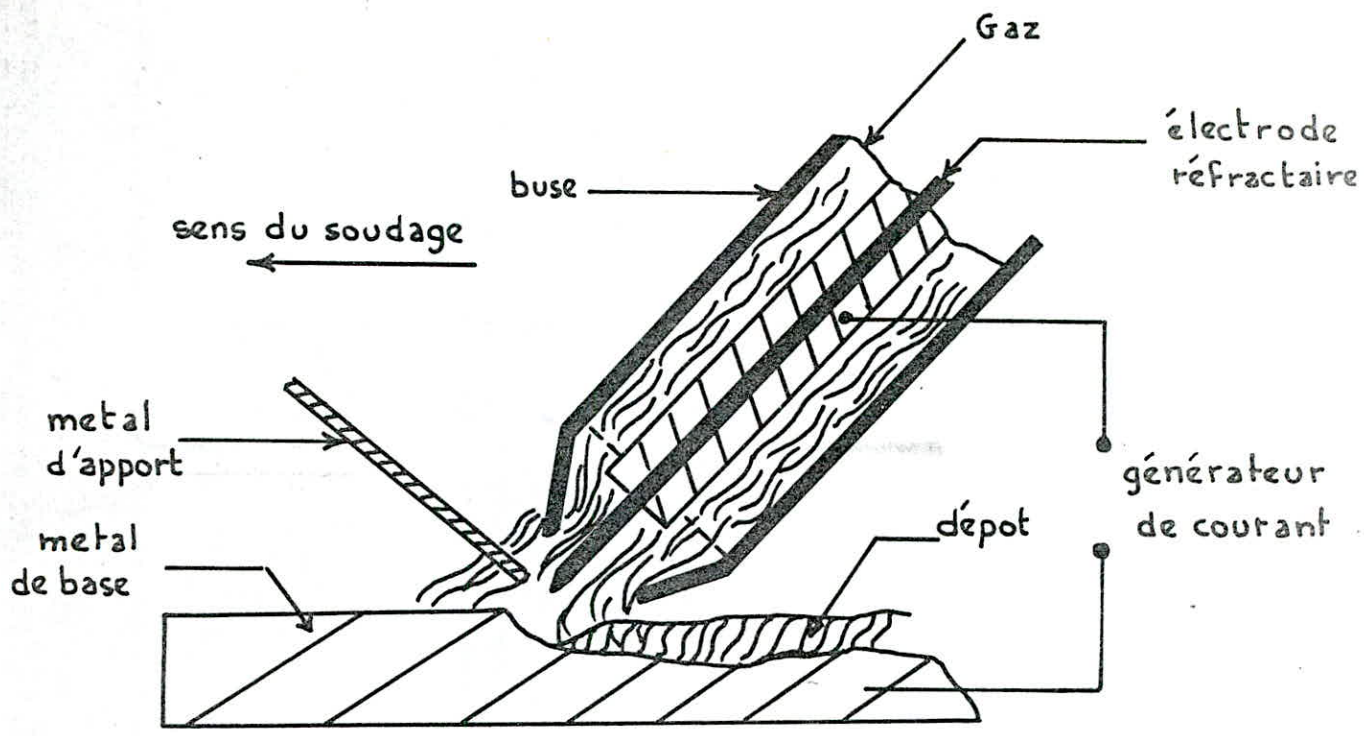
Actif à partir d'une certaine température, il se décompose selon la réaction endothermique :  $2 \text{CO}_2 \longrightarrow 2 \text{CO} + \text{O}_2$  se reconstitue sur la pièce froide  $2 \text{CO} + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{CO}_2$ , réaction exothermique qui favorise la pénétration de la zone fondue.

#### 2.6.4. Domaine d'application des procédés de soudage à l'arc électrique

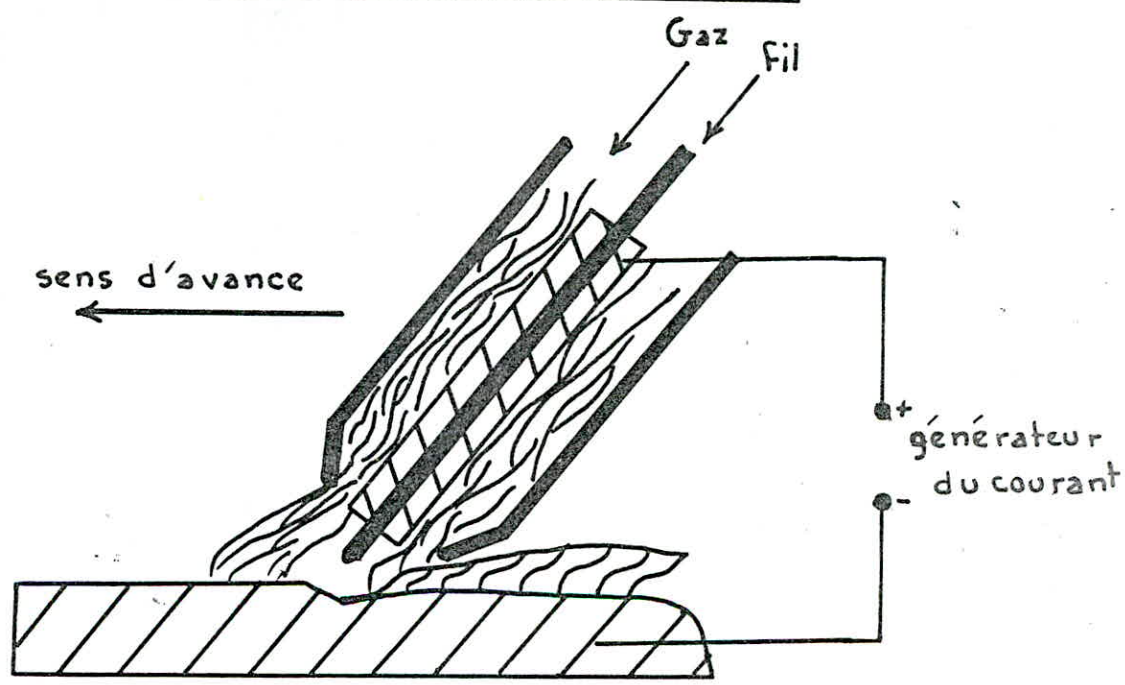
##### Sous protection gazeuse :

- Procédés MIG et MAG : utilisés pour le soudage de nombreux alliages ferreux ou non ferreux en toutes position.

- Procédé TIG : il permet le soudage des métaux et alliages ferreux et non ferreux en particulier l'aluminium, le cuivre et le nickel, en toutes positions.



( Fig1c) Soudage TIG : Schéma du principe



( Fig1d) Soudage MIG : Schéma du principe

CHAPITRE - III  
\*\*\*\*\*

III - LA SOUDABILITE DE LA FONTE.

- 3.1. - Généralités sur le soudage des fontes.
- 3.2. - Les procédés courants de soudage des fontes à graphite sphéroïdal.
- 3.3. - Soudabilité de la fonte à graphite sphéroïdal avec le même métal d'apport.
- 3.4. - Soudabilité de la fonte à graphite sphéroïdal avec différents métaux d'apport.

### III - La soudabilité de la fonte :

#### 3.1. Généralité sur le soudage des fontes :

C'est l'état physico-chimique du carbone qui caractérise une fonte que l'on peut classer, de ce fait, dans l'une des quatre familles suivantes :

##### a) Fontes grises ou graphitiques :

Ce sont des fontes usinables à l'outil. Elles sont soudables à l'arc électrique, avec électrodes spéciales soit de type basique ( dépôt inusable à l'outil seulement à la meule), soit de type ferro-Nickel ou Nickel ( dépôt usinable à l'outil).

##### b) Fontes blanches :

En raison de leur grande fragilité, elles ne sont pratiquement pas soudables. En général, on pratique un rechargement pour compenser l'usure des pièces si cela est nécessaire mais jamais une opération de soudage.

##### c) Fontes malléables :

Ce sont des fontes hétérogènes ( fer en surface et à l'intérieur de petits noyaux de graphite ou de type européen : Fer en surface, puis aciers au carbone et coeur en fonte grise). Leur soudabilité ( par fusion ) est très difficile, car l'opération de soudage crée systématiquement des altérations profondes ( très grande fragilité du joint ). Seul le soudo-brasage avec un laiton spécial au silicium comme métal d'apport, donne des résultats acceptables à condition que l'échauffement des pièces soit minimum.



#### d) Fontes à graphite sphéroïdal :

Ce sont des fontes intermédiaires entre les fontes ordinaires et l'acier moulé; on les obtient par le passage de la fonte lamellaire du carbone à la forme sphéroïdale. On améliore ainsi les caractéristiques mécaniques du matériau ( augmentation de la dureté et de la résilience ).

Elles sont surtout soudables avec des électrodes de type Ferro-Nickel ou Nickel.

L'aptitude au soudage des fontes est généralement très médiocre : elles sont fragiles (ductibilité faible, résilience presque nulle) et sont hétérogènes sur le plan physique, chimique, et mécanique. Sur l'effet du cycle thermique de soudage, la zone affectée par la chaleur devient extrêmement fragile ( formation de la fonte blanche ); ceci conduit à n'adopter la solution soudée que pour réparation ou le chargement des pièces accidentées ou usées.

#### 3.2. Les procédés courants de soudage des fontes à graphite sphéroïdal :

Les fontes à graphite sphéroïdal ou fontes ductiles sont des fontes dans lesquelles, après solidification dans le moule, le graphite se présente sous forme de sphères bien formées dans une matrice ferrite, de perlite, ou encore d'austenite, de bainite, etc... Les procédés généralement employés sont le soudage à l'arc avec électrode consommable et le soudage au chalumeau oxyacétylénique avec baguette en fonte ductile. Le soudage à l'arc court sous argon qui est un procédé récent de plus en plus employé.

##### - Le soudage à l'arc :

Le soudage à l'arc est plus rapide que le soudage au chalumeau oxyacétylénique. Bien que la température du soudage soit plus élevée dans le soudage à l'arc, l'apport total de chaleur est plus faible que pour le soudage oxyacétylénique en raison de la rapidité de l'opération et de l'étroitesse de la région réchauffée par l'arc. Ainsi, la zone thermiquement affectée est plus limitée.

### - Soudage au chalumeau oxyacétylénique :

Ce procédé est mis en oeuvre lorsque la zone de soudage doit avoir des propriétés mécaniques et une tenue à la corrosion aussi proche que possible de celle de la pièce. L'emploi d'un métal d'apport analogue mais contenant un élément nodulisant facilite l'obtention de la structure sphéroïdale dans le joint.

La flamme sera neutre ou légèrement reductrice pour protéger le métal de base et le métal d'apport de l'oxydation. Des flux sont nécessaires pour continuer cette protection.

La température de préchauffage sera légèrement plus élevée que pour la fonte grise ( environ 600°C ).

Lorsque l'usinabilité ou la précision dimensionnelle sont importantes un traitement de relaxation des tensions à 600 - 750°C est recommandé.

Lorsque la pièce doit supporter des charges, avoir une ductilité ou résistance, un traitement de recuit est nécessaire.

#### §.2.1. Economie et choix du procédé :

Il peut être avantageux de faire des assemblages par soudage dans certaines circonstances :

- Si une pièce composée d'éléments en fonte et en acier est nécessaire en raison des conditions d'emploi.

- Si la pièce est de forme compliquée ou de grande dimension

le choix du procédé dépend de facteurs tels que :

. Conditions de service de l'assemblage et, en particulier, du joint, propriétés nécessaires.

. Si la soudure doit être usinable.

. Nombre de soudure à effectuer et vitesse de soudage.

. Matériel disponible ou à acheter et si la soudure doit être effectuée en atelier ou en chantier.

. Emplacement de la soudure.

Ces facteurs très importants devront être associés au calcul du prix de revient et seront souvent déterminants.

### 3.3. Soudabilité de la fonte à graphite sphéroïdal avec le même métal d'apport :

Réaliser un assemblage homogène, c'est assurer dans l'ensemble du joint soudé la meilleure homogénéité possible de composition de structure, ainsi que des propriétés physique et mécaniques. Cela à l'aide de produits d'apport, déposant un métal d'analyse analogue à celui du métal de base.

#### 3.3.1. Action thermique du soudage :

Le soudage par fusion comporte une certaine pénétration, une partie du métal de base est fondue et mélangée au métal d'apport pour former le métal déposé.

Les zones adjacentes à la ligne de fusion subissent un échauffement très rapide suivi d'un refroidissement relativement plus lent.

La température maximale atteinte se situe juste sous le joint de fusion ; à la liaison, puis décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de celle-ci. Le gradient de ces températures de pointe dépend de l'apport et de l'écoulement calorifiques. Il détermine la largeur de la zone qui dépasse les points de transformation et est, de ce fait le siège de modifications structurales visibles. C'est ce que nous appellerons zone Thermiquement Influencée.

Ils'y produit une mise en solution du carbone : rapide à partir de la perlite, plus lente à partir du graphite.

Pour des vitesses de refroidissement croissantes, il se formera, dans l'ordre :

- A haute température : graphite, graphite et cementite ou cémentite seule ( trempe lédeburitique ).

- Ensuite : ferrite, perlite, bainite ou martensite.

Cela est valable aussi pour le métal déposé de même nature.

**Les structures** formées par refroidissement rapide ( Lédéburite et martensite ) sont fragiles et génératrices de fissuration lors du soudage ou en service. Il faut donc les éviter par un régime soudothermique approprié ou les transformer par un traitement thermique après le soudage.

### 3.3.2. Régimes soudothermiques :

#### a) Principes :

Un apport calorifique élevé permet de ralentir le refroidissement, mais accroît la mise en solution du carbone dans les zones influencées thermiquement.

- Une préchauffe de la pièce à souder, diminue les tensions. Elle ralentit le refroidissement : faiblement à haute température, puis d'une manière d'autant plus sensible que l'on descend vers la température de la pièce. La température de préchauffe doit être maintenue pendant toute l'opération de soudage ( température interpasses ). Cela permet aisément d'éviter la formation de martensite ; par contre, il est difficile d'empêcher la formation d'une certaine quantité de carbures.

#### b) Soudage à froid :

On entend par " Soudage à froid " le soudage avec apport calorifique minimal afin de limiter l'influence thermique : faible intensité, petits cordons avec refroidissement intermédiaire. La trempe lédéburitique sera ainsi limitée à une bande étroite, parfois interrompue. La martensite sera évitée par une préchauffe de 150 à 300°C. Si l'assemblage est peu sollicité, il peut être utilisé tel quel, sinon il convient de le traiter thermiquement.

#### c) Soudage à chaud :

La préchauffe atteint 600 - 700°C, l'apport calorifique est élevé et les bains de fusion volumineux. On évite ainsi les tensions et la trempe lédéburitique. Mais, le plus souvent, ce régime est difficilement applicable.

#### d) Régimes intermédiaires :

On tolère ici la formation d'une certaine quantité de carbure, tout en limitant les tensions sous le niveau critique. Le joint est ensuite traité thermiquement, de préférence sans

refroidissement intermédiaire.

La température de régime ( préchauffe et interpasses ) dépend du bridage, de l'apport calorifique et de la massivité des pièces. En assemblage, elle se situe entre 300 et 500°C. En rechargement, ou en retouches de moulages, le régime peut souvent être simplifié. Un refroidissement suffisamment lent est parfois assuré par le seul apport calorifique, lorsque l'on dépose beaucoup de métal par rapport à la masse de la pièce.

Si l'on soude avant le recuit de ferritisation éventuel, il servira également de traitement après soudage.

### 3.3.3. Traitements thermiques :

Les traitements thermiques après soudage ont pour but de réduire les tensions, éliminer les carbures ( graphitisation ) et les structures de trempe.

Ils seront fonction du métal de base, plus longs pour les fontes perlitiques, voici deux traitements thermiques classiques :

a) Chauffage jusqu'à 900°C - 920°C, un maintien à cette température pendant 2 heures, descente puis maintien à 700°C, de 6 à 16 heures, puis refroidissement à l'air calme.

b) Chauffage à 900°C - 920°C, le maintien à cette température pendant 2 heures, puis refroidissement dans le four ( refroidissement lent ), pour les fontes ferritiques.

### 3.4. Soudabilité de la fonte à graphite sphéroïdal avec différents métaux d'apport.

Les électrodes les plus couramment employées sont des électrodes enrobées Fer-Nickel ( à 55% de nickel ). Il est recommandé pour éviter la formation de porosités dans le métal déposé d'étuver les électrodes ou de les maintenir sèches.

a) Les fontes à graphite sphéroïdal austénitiques sont sensibles à la crique dans les parties qui ont été affectées par la chaleur. Cette tendance est influencée par les teneurs en Mg, Si et P, qui devront être respectivement inférieures à 0,06 %, 1,5 % et 0,02 %. Au contraire, une addition de 0,1 - 0,3 de Niobium est favorable ( pas de préchauffage ).

Aux Etats-Unis, l'international Nickel Ltd a mis au point une électrode spéciale de Nickel-Fer-Magnesium à 20 % de Nickel dont les caractéristiques de solidification s'harmonisent avec celles du métal de base et qui donne un pourcentage de criques insignifiant.

b) Pour les fontes ferritiques un préchauffage n'est généralement pas nécessaire. Tenir compte cependant de la température ambiante et tensions qui peuvent prendre naissance en fonction du tracé des pièces ou du montage. Dans certains cas un préchauffage à basse température 100 - 200°C peut être utile.

c) Pour les fontes perlitiques un préchauffage à une température de 200 - 300°C est recommandé.

Pour minimiser la dilution du métal d'apport dans le métal de base, il est désirable de maintenir la température de la soudure aussi basse que possible. On utilisera un ampérage suffisant pour permettre une vitesse convenable de soudage. Le diamètre de l'électrode sera le plus faible possible mais au moins au tiers de la largeur du dépôt. La dureté de la zone thermiquement affectée est fonction de la vitesse de refroidissement. Aussi, il peut être bénéfique de la ralentir en recouvrant la pièce de matériaux isolants. Si on désire des propriétés optimales du joint ou si une bonne usinabilité est recherchée, un traitement thermique graphitisant ( recuit ou normalisation comprenant un maintien de 3 ou 4 heures à 900°C ) doit permettre d'éliminer les carbures. Par ailleurs, dans les conditions bien déterminées de soudage, on peut obtenir une distribution discontinue des carbures, dans le joint. Par exemple pour l'assemblage de l'acier doux avec la fonte à graphite sphéroïdal

par une soudure d'angle avec électrode Nickel - Fer, en utilisant la largeur d'arc la plus courte possible et en concentrant autant que possible l'énergie de l'arc sur l'acier doux, celui-ci absorbe la plus grande partie de la chaleur dégagée par l'arc.

Un traitement de relaxation des tensions à 600 - 620°C peut être pratiqué pour les fontes ferritiques. Le soudage à l'arc court est une variante du procédé traditionnel sous argon. Le courant et le voltage sont plus faibles ( 90 - 160 A selon la vitesse de soudage 18 - 24 V ). Le fil plus fin (  $\phi$  0,8 mm ), plonge dans le bain et, en fondant, provoque une série de courts-circuits ( 100 à 160 A par seconde ).

Il a été établi que les fils en " Nickel ( 61 ) " employés sous argon donnent les meilleurs résultats. La composition est la suivante :

Ni	Cu	Fe	Al	Ti	Si	C	S
93 mm	0,25	1	1,5	2,0-2,5	0,75	0,15	0,01

La caractéristique est un bain peu important, le taux élevé de métal déposé par rapport à l'apport de chaleur, la zone thermiquement affectée plus étroite qu'avec les autres procédés.

Pour les sections peu épaisses, les carbures moins nombreux ont tendance à se former autour des nodules de graphite. Cette distribution discontinue est relativement peu dangereuse.

- Les fontes Ferritiques peuvent habituellement être soudées sans préchauffage. En cas de conditions défavorables ( température ambiante basse ou possibilité d'apparition de tensions ) un préchauffage à 160 - 200°C est recommandable.

- Les pièces en fonte perlitique de formes simples peuvent être soudées sans préchauffage. Pour des sections épaisses et bridées un préchauffage de 200°C peut être nécessaire. Le seul traitement généralement applicable après soudage est un traitement de relaxation des tensions à 600 - 620°C.

C H A P I T R E - IV.  
\*\*\*\*\*

IV - MATERIAUX ETUDIES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.

4.1 - Matériaux étudiés.

4.1.1. - Métal de base.

4.1.2. - Métal d'apport

4.1.3. - Echantillons et machine à souder.

4.2. - Techniques expérimentales.

4.2.1. - Traitements thermiques.

4.2.2. - Essais mécaniques.



#### 4 - Matériaux étudiés et techniques expérimentales

##### 4.1. - Matériaux étudiés

###### 4.1.1. - Métal de base :

Dans nos essais, nous avons utilisés comme métal de base la fonte GSC 38 - 15 de composition chimique :

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mg
3,7%	2,55%	0,3%	0,01%	0,04%	0,01%	0,05%	0,045%

###### 4.1.2. - Métal d'apport

Pendant l'opération de soudage, trois métaux d'apports différents sont utilisés :

###### 4.1.2.1. - Métal d'apport en fonte :

C'est une électrode enrobée de diamètre  $\phi = 3,25$  mm constituée par une âme métallique en fonte et d'un revêtement basique.

La composition chimique du métal d'apport est :

C	Mn	Si
3,5%	0,3%	3,5%

###### 4.1.2.2. - Métal d'apport en Inox ( 18%Cr - 8%Ni )

C'est une électrode enrobée de diamètre  $\phi = 3,2$  mm, constituée par une âme métallique en Inox ( 18%Cr - 8%Ni ), et d'un revêtement basique

La composition chimique du métal d'apport :

C	Mn	Si	Cr	Ni
≤ 0,04%	≤ 2,5%	≤ 0,9%	(18 - 21)%	(9 - 11)%

4.1.2.3. - Fil mig-mag. (Acier faiblement allié) :

C'est un fil électrode fourré de composition chimique :

C	Mn	Si	S	P
0,1%	~1%	0,6%	< 0,025%	< 0,025%

Durant l'opération de soudage, avec ce fil, les assemblages sont protégés par un gaz actif ( CO<sub>2</sub> ).

4.1.3. - Echantillons et machine à souder

4.1.3.1. - Echantillons de traction et de résilience

Les échantillons destinés à la préparation des éprouvettes sont coulés dans des lingots - échantillons. Les éprouvettes de traction coulées à part, avec du métal provenant de la même poche.

Après déssablage et meulage ; les échantillons ont été sectionnés dans leur milieu et resoudés par un joint en X de 45°.

La préparation des éprouvettes a été faite à l'aide d'une fraiseuse universelle pour les éprouvettes de résilience, et d'un tour universel pour les éprouvettes de traction. La finition a été faite au moyen d'un papier abrasif.

Dans notre étude, nous avons utilisés pour l'essai de traction une machine universelle de type U5D.R, et pour l'essai de résilience une machine " CHARPY " de type N° NC - 2710.

- Poids du pendule = 23,525 Kg
- Rayon du pendule = 0,671 m.

- Micrographie :

L'étude des microstructures a été faite au moyen d'un microscope optique de marque ZEISS.

- Prélevement :

Les échantillons destinés pour la micrographie ont été prélevés par des coupes transversales aux soudures à l'aide d'une transeuse, en utilisant un lubrifiant pour éviter l'échauffement des pièces.

- Enrobage :

L'enrobage est fait avec une résine à froid.

- Polissage :

Le polissage est effectué sous un courant d'eau avec des papiers abrasifs dans un ordre croissant :  
180, 400, 600, 800, 1000

- La finition :

Est faite au moyen d'un feutre, ajoutant de la patte diamantée et du lubrifiant.

- L'attaque chimique :

On utilise comme réactif pour l'attaque le Nital de composition chimique :

- Acide Nitrique concentré (  $\text{HNO}_3$  ) : 5  $\text{cm}^3$
- Alcool Ethylique (  $\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{OH}$  ) : 95  $\text{cm}^3$

#### - Mesure de la microdureté

Les échantillons destinés aux mesures de dureté sont prélevés par des coupes transversales aux soudures. Les coupes sont faites par moyens mécaniques sans écrouissage en évitant l'échauffement des pièces. La surface à examiner est alors dressée, éventuellement réctifiée puis polie avec des papiers abrasifs de plus en plus fins. Pour une meilleure mise en évidence des zones de transformation et pour la mesure précise des dimensions des empreintes, la finition doit être faite avec un feutre, en ajoutant de la patte diamantée. L'échantillon subit ensuite une attaque micrographique au Nital pour permettre l'identification, sous le microscope de la machine de dureté de type O.P.L à cycle automatique des zones thermiquement affectée et de la zone de liaison.

La mesure des microduretés est faite par filiation parallèlement à la surface de l'échantillon et à 2 mm de celle-ci.

La distance entre les différentes empreintes successives, mesurée de centre à centre des empreintes est de 0,7 mm

La charge appliquée est de 300 Grammes.

#### 4.1.3.2. - Machine à souder

Une machine à souder de type SAFEX C2 est utilisée pour le soudage avec les électrodes en fonte et en Inox (fig.4 )

##### Les caractéristiques de la machine :

Les caractéristiques de la machine SAFEX C2 sont conformes à la norme française NF A85 - 011

Numéro de Référence .....	0320 - 0500
Courant de soudage mini .....	30 A
Courant de soudage maxi .....	300 A
Tension .....	220/380 V
Fréquence .....	50 HZ
Dimensions : L x l x h (mm) .....	900X650X750
Poids .....	235 Kg

Le SAFEX C2 est caractérisé par un courant de soudage continu, triphasé. Il est équipé d'un dispositif de réglage continu du courant par rhéostat.

Le soudage sous protection gazeuse avec un fil fourré en acier faiblement allié est effectué à l'aide d'une machine de type SAFMIG 340 b1 (fig.5 )

Les caractéristiques de la machine :

Les caractéristiques de la machine SAFMIG 340 b1 sont conformes à la norme française NF A85 - 013

Numéro de Référence .....	340 b1
Tension .....	220/380 V
Fréquence .....	50 - 50 HZ
Dimension ( mm ) .....	90 X 410 X 885
Poids .....	125 Kg

Le SAFMIG 340 b1 est caractérisé par un courant continu, triphasé

4.2. - Techniques expérimentales

4.2.1. - Traitements thermiques

Le but des traitements thermiques des fontes à graphite sphéroïdal est d'arriver à des caractéristiques mécaniques bien déterminées.

- Recuit de ferritisation

Les fontes à graphite sphéroïdal brut de coulée contiennent souvent une certaine proportion de perlite, pour l'éliminer, et donner l'homogénéité à la structure, et d'améliorer, par conséquent les propriétés mécaniques, on a effectué un traitement ferritisant qui consiste à :

- Chauffage et maintien ( 875°C, 3 heures ), puis refroidissement lent dans le four ( porte fermée ).

- Trempe et revenu

La dureté des fontes à graphite sphéroïdal peut être augmentée par

un traitement thermique qui consiste en un chauffage à une température bien déterminée ( 920°C ) pendant un temps de maintien de 30 minutes, suivi d'un refroidissement rapide dans l'eau.

Le revenu à basse température ( 200°C ) permet de diminuer les effets de la trempe, d'homogénéiser et stabiliser les propriétés mécaniques et de faire disparaître les tensions internes.

#### 4.2.2. - Essais mécaniques

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques des métaux et alliages.

- Résistance du métal au choc : Essai de résilience
- La plasticité et l'élasticité : Essai de traction
- La résistance aux efforts de pénétration : Essai de dureté

##### Essai de traction :

L'essai de traction consiste à exécuter sur une éprouvette de forme et de dimensions déterminées, un effort que l'on fait croître progressivement ; on enregistre les variations de sa longueur en fonction de l'effort qui lui est appliqué.

Au cours de l'essai de traction on constate des variations des dimensions de l'éprouvette, et pour étudier ces variations on considère la grandeur suivante :

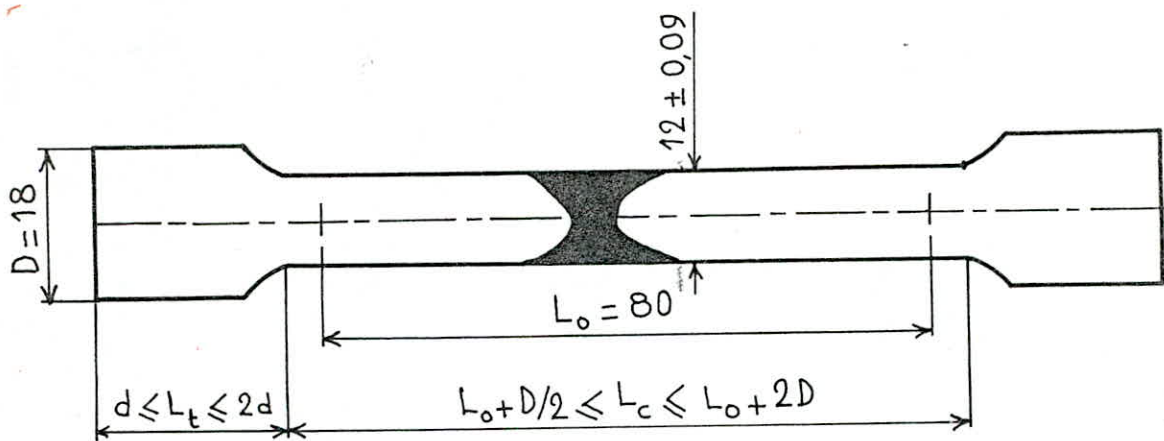
L'Allongement A % =  $\frac{L - L_0}{L_0} \times 100$  , avec  $L_0$  et  $L$  : longueur avant et après l'essai. ( voir Fig. 2 )

##### Essai de résilience :

L'essai de résilience a pour but de déterminer la tenacité d'un métal c.a.d sa résistance au choc, elle est mesurée par l'énergie nécessaire pour provoquer la rupture d'une éprouvette entaillée en V et reposant sur deux appuis.

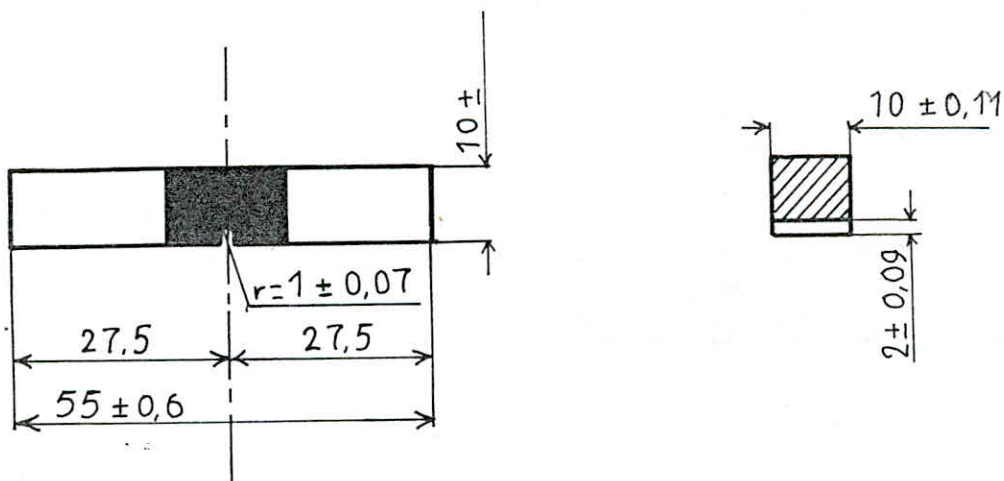
La résilience  $K$  est exprimée par le quotient de l'énergie absorbée pour la rupture, par la section de l'éprouvette au droit de l'entaille.

$$K = \frac{W}{S_0} \quad ( \text{da.j} / \text{cm}^2 )$$



Epreuve de traction NF A 03.151

(Fig 2)



Epreuve de résilience NF A 03.156

(Fig 3)

$W$  = L'énergie absorbée par la rupture

$S_0$  = Section unitaire.

(voir fig. 3)

### Essai de dureté

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui.

- Méthode Vickers ( NFA 03 - 154 )

Le pénétrateur est une pyramide en diamant à base carré dont l'angle au sommet est de  $136^\circ$ . Il détermine dans le métal une empreinte pyramidale de surface  $S$ .

La dureté Vickers est déterminée par le rapport :

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

$P$  = L'effort appliqué ( Kg force )

$S$  = Surface ( latérale de l'empreinte.

$$S = \frac{d^2}{2 \sin 68^\circ}$$

$$H = \frac{2 P \sin 68^\circ}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2}$$

L'effort appliqué est compris entre 5 à 120 Kg. F



Le soudage en courant continu permet de fondre tous les types d'électrodes et en particulier les basiques.

The DC welding process enables the melting of all types of electrode, specially low-hydrogen electrodes.

postes à redresseurs  
pour le soudage  
en courant continu  
rectifier sets  
for dc  
welding  
**safex C**



(Fig 4)

générateur de courant  
semi-automatique,  
à dévidoir intégré  
semi-automatic  
current generator with  
integrated wire feed  
**safmig bl**



(Fig5)

CHAPITRE V. - Résultats et commentaires.

5.1 - Résultats.....	47
5.2.- Commentaires et interprétations des structures.....	81
5.3.- Commentaires et interprétations des caractéristiques.....	84
CONCLUSION.....	86
BIBLIOGRAPHIE.....	87

\*\*\*\*\*

## 5.1 - RESULTS :

Les résultats des essais mécaniques obtenus sur les différentes éprouvettes et échantillons soudés avec une fonte, un acier austénitique inoxydable au Chrome-Nickel et un acier faiblement allié, à l'état brut de coulée, recuit, et à l'état trempé plus un revenu à basse température, sont illustrés dans le tableau N°2, de même les courbes évaluant les microduretés sont illustrées dans les fig. (7,9,11,13,15,17,19, 21, et 23), d'autre part une étude micrographique nous a permis de représenter les différentes microstructures illustrées dans les fig.(6,8,10,12,14,16,18,20 et 22)

Eprouvettes Soudées	Traitement thermique	Charge à la rupture (daN)	Resistance à la rupture (daN/mm <sup>2</sup> )	Allongement (A%)	Resilience K (daJ/cm <sup>2</sup> )	Resilience K' (daJ/cm <sup>2</sup> )
Fonte GSC 38-15 soudée avec une fonte GSC.	Brut de Coulée	3750	33,17	0	2,13	2,13
	Recuit	3880	34,32	1,25	2,70	2,31
	Trempe + Revenu	3350	29,63	0	1,91	2,13
Fonte GSC 38-15 soudée avec un acier faiblement allié	Brut de Coulée	5150	45,55	0	1,94	1,41
	Recuit	4600	40,69	2,50	2,13	1,94
	Trempe + Revenu	5100	45,11	0	1,41	1,24
Fonte GSC 38-15 soudée avec un acier austénitique INOX	Brut de Coulée	4640	41,04	0	1,94	1,41
	Recuit	4080	36,09	0,62	1,94	1,41
	Trempe + Revenu	5650	49,98	0	1,41	1,66

tableau N°2

$F/S_0$  (dan/mm<sup>2</sup>)

8,84  
17,69  
2653  
35,31  
44,21  
5305

Fonte GSC soudée avec une Fonte GSC (Brut de coulée)

GSC soudée avec une Fonte GSC (Recuit)

GSC soudée avec une Fonte GSC (Trempe + Revenu)

GSC soudée avec un acier faiblement allié (Brut de Coulée)

GSC soudée avec un acier faiblement allié (Recuit)

GSC soudée avec un acier faiblement allié (Trempe + Revenu)

GSC soudée avec un INOX (Brut de coulée)

GSC soudée avec un INOX (Recuit)

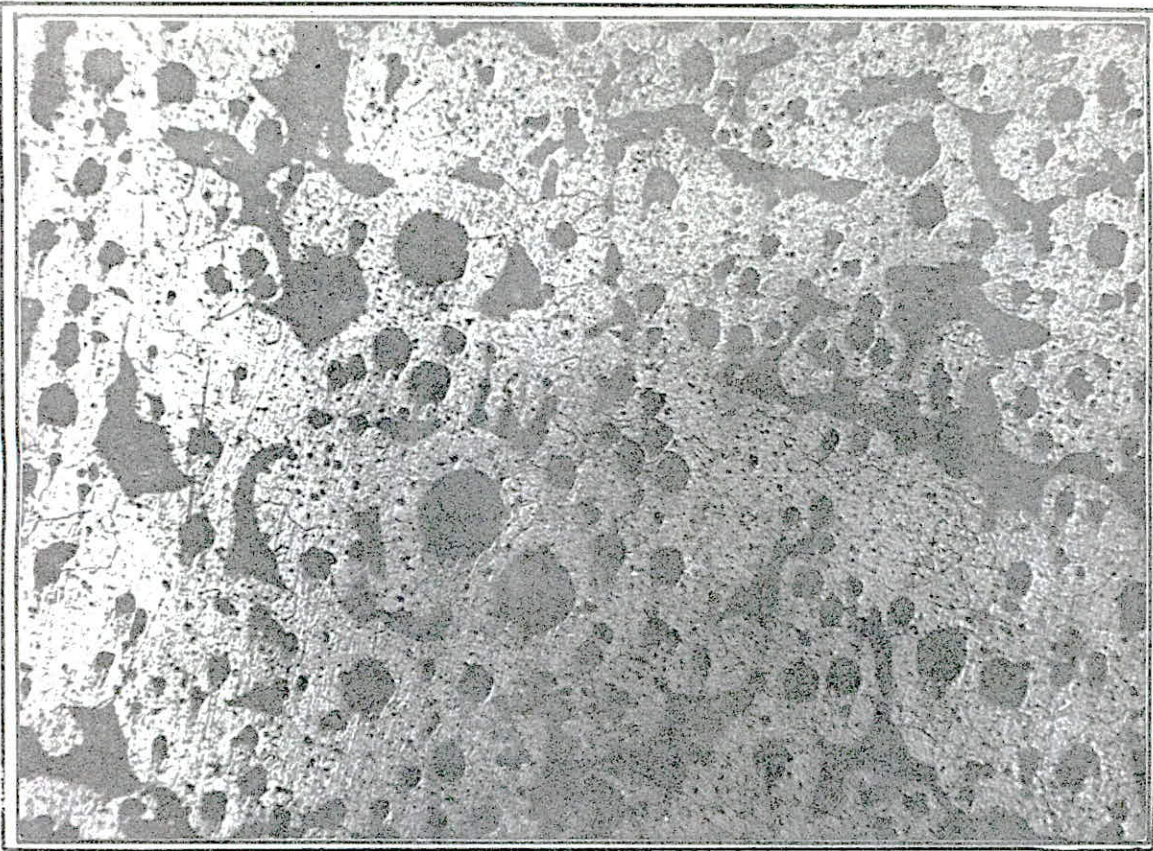
GSC soudée avec un INOX (Trempe + Revenu)

Eprouvette de ref en Fonte GSC 38-15 non soudée (Trempe + Revenu)

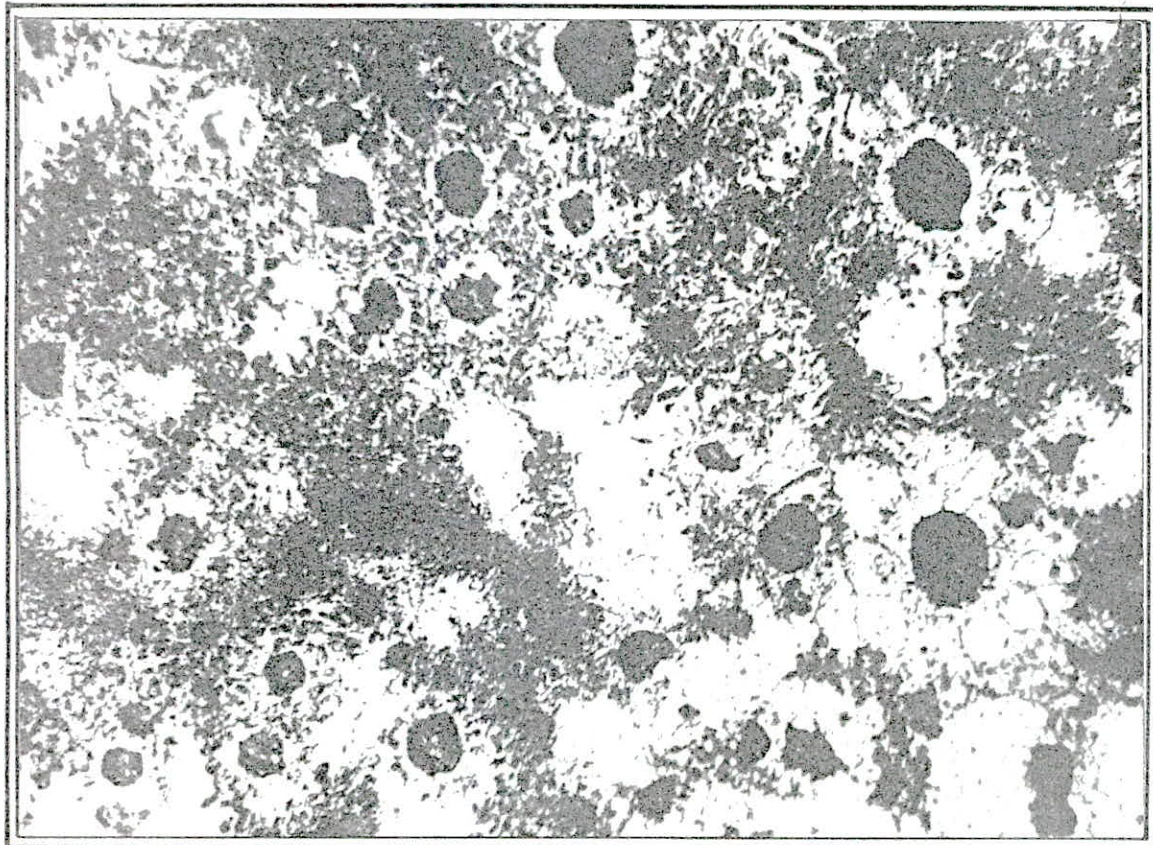
Echelle  
1 cm  
8,84 dan/mm<sup>2</sup>

(Fig 5a)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec une fonte "Brute de coulée"



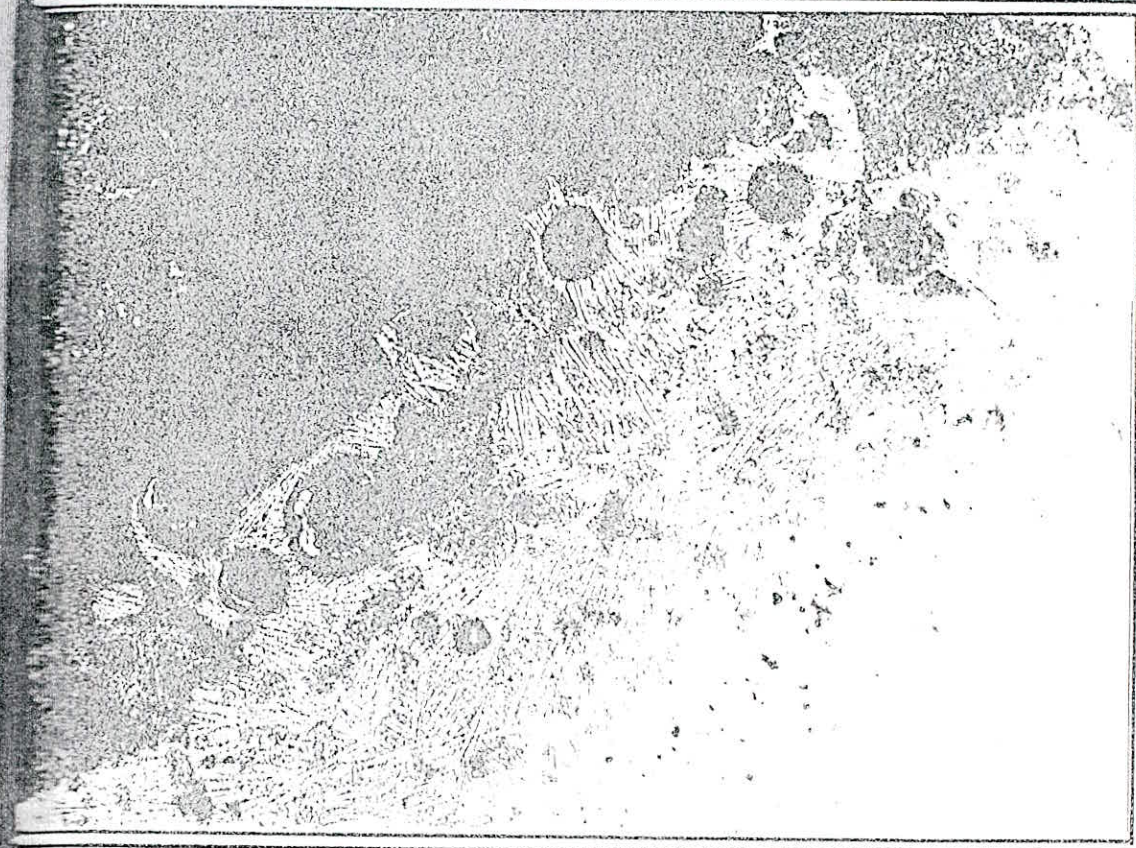
Nital M.B (a) X450



Nital Z.A.T (b) X450

(Fig 6)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec une fonte "Brute de coulée"



Nital Z.A.T. - MF (c) X450



Nital MF (d) X450  
(Fig 6)



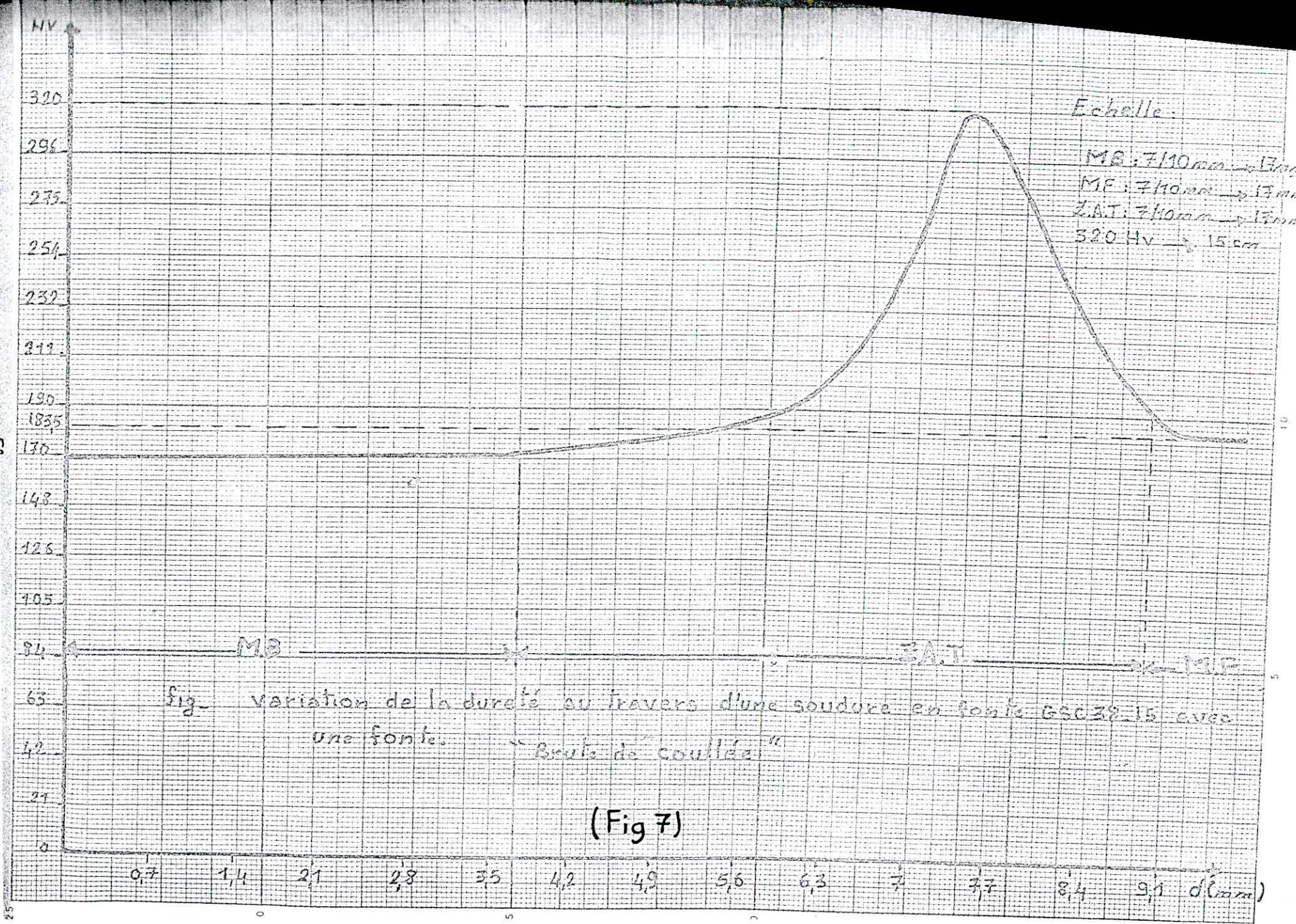
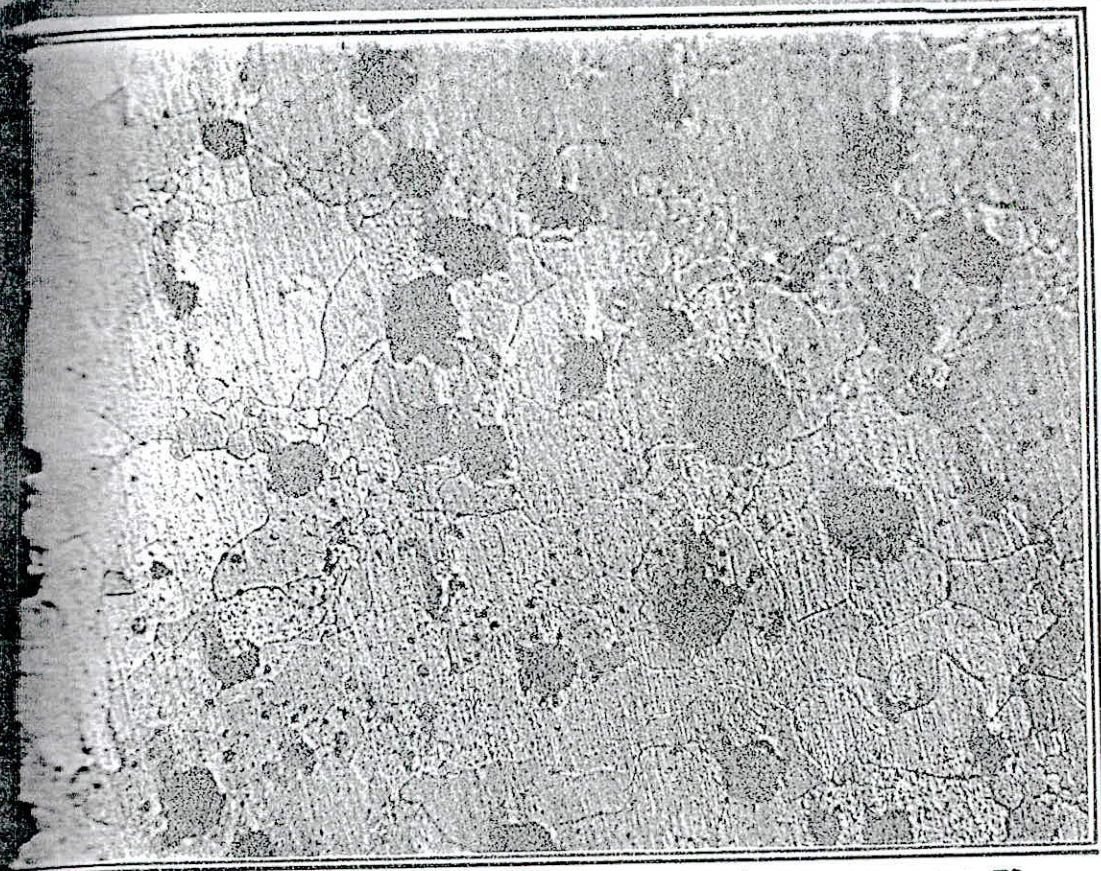


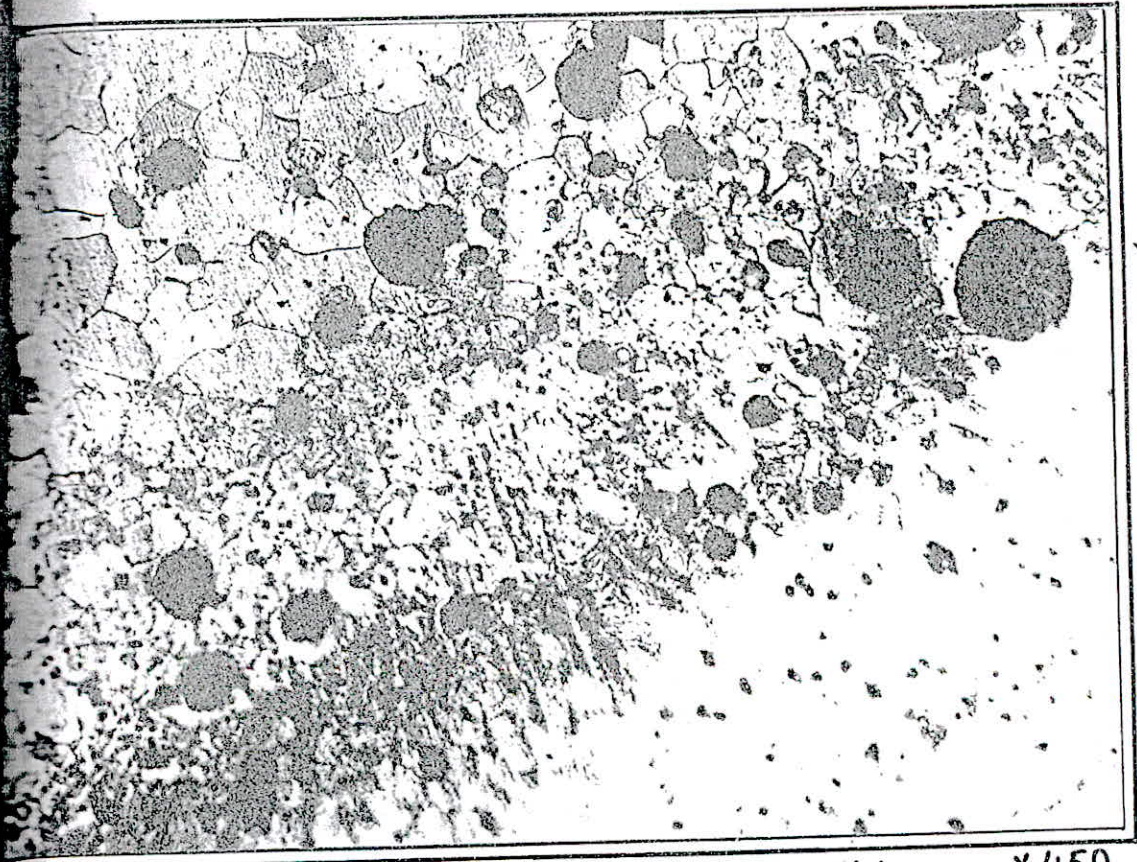
Fig. variation de la dureté au travers d'une soudure en fonte GSC38-15 avec une fonte "Brute de coulée"

(Fig 7)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec une fonte "Recuit"

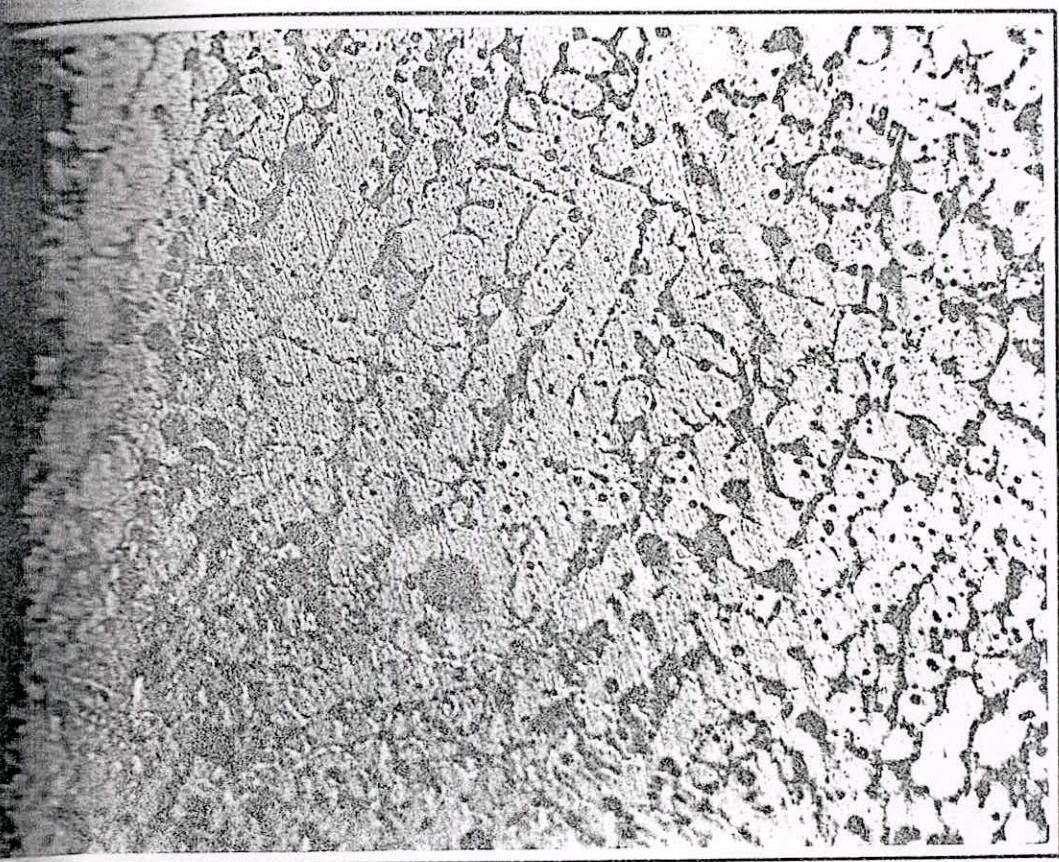


M.B (a) X 450



Nital MB\_ZAT\_MF (b) X 450 (Fig 8)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec une fonte "Recuit"



MF (c) X450  
(Fig 8)

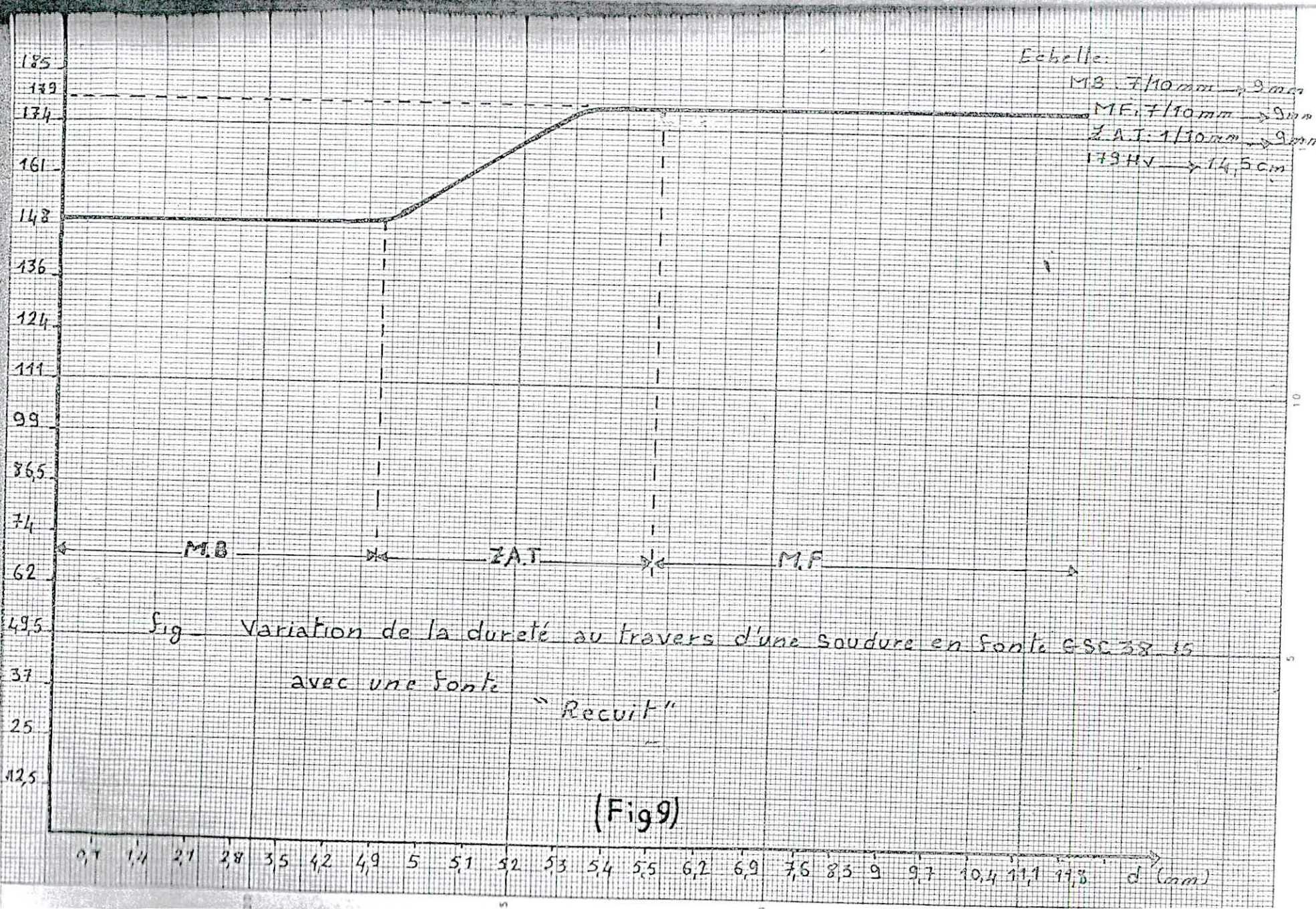
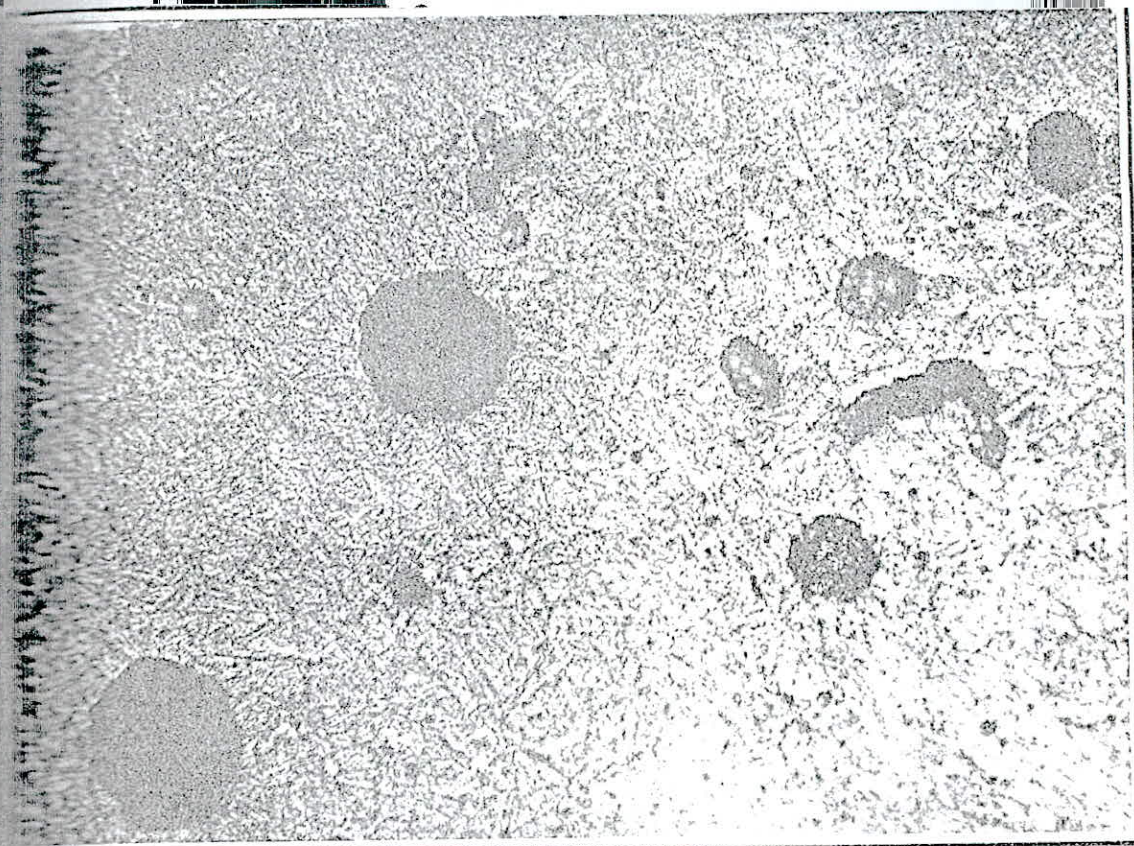


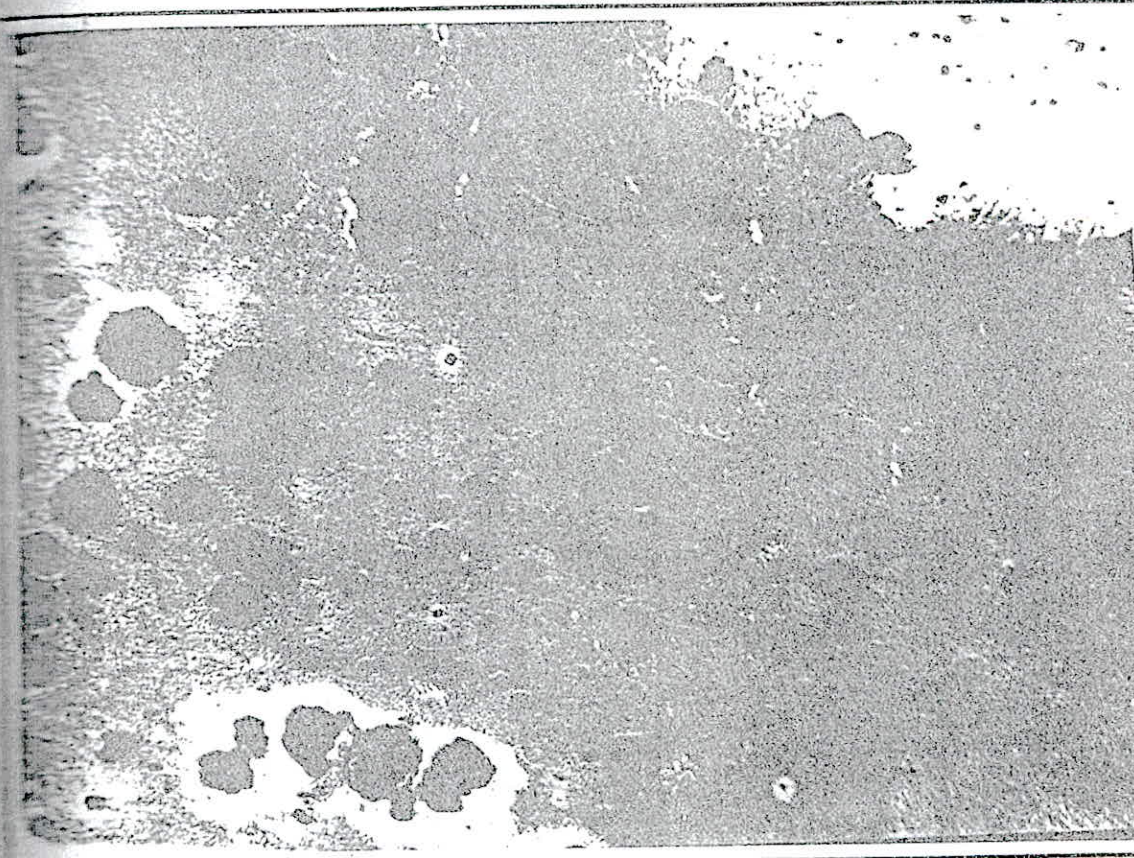
Fig - Variation de la dureté au travers d'une soudure en fonte GSC 38 15  
 avec une fonte "Recuit"

(Fig9)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec une fonte "Trempe + Revenu à B.T°"



Nital MB (a) X 200



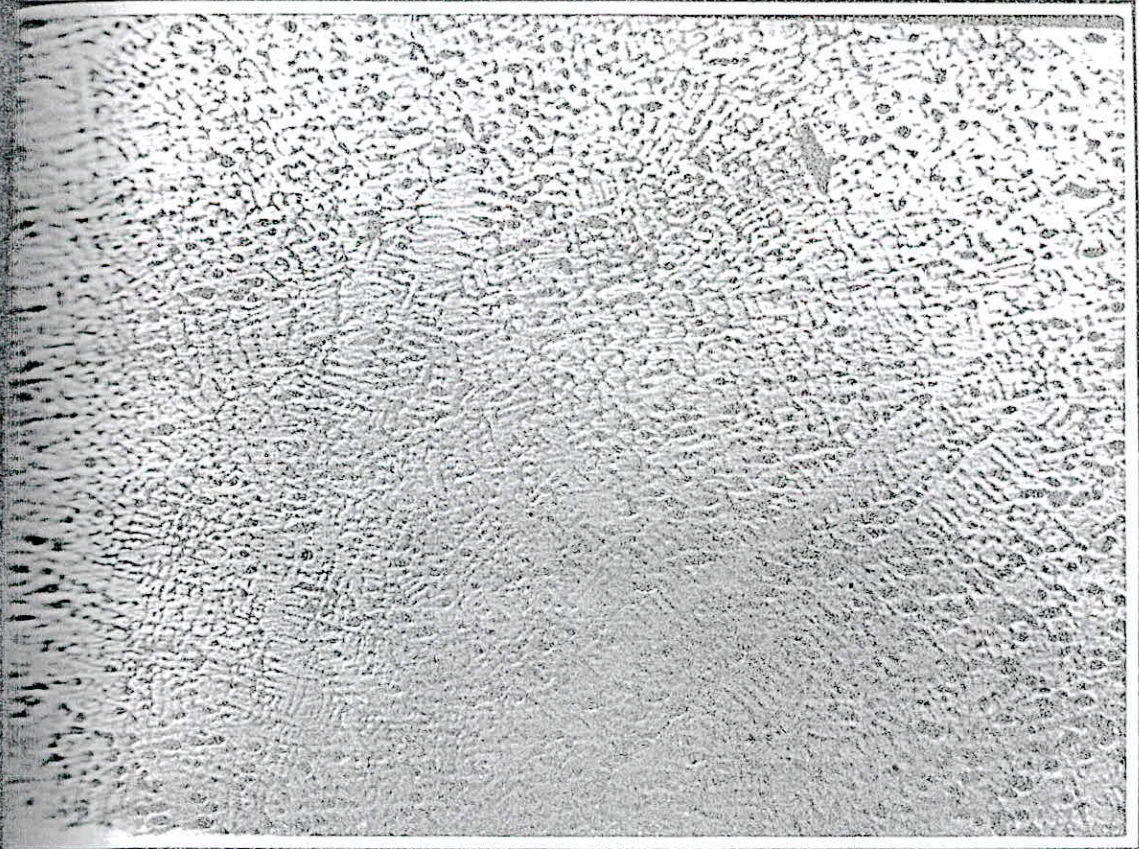
Nital ZAT (b) X 250

(Fig 10)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec une fonte "Trempé + Rev à B.T°"



ZAT - MF (c) X200



MF (d) X200  
(Fig 10)

Echelle:

M.B. : 7/10 mm      15 mm  
 M.F. : 7/10 mm      15 mm  
 Z.A.T. : 1/10 mm      15 mm  
 927 HV      13 cm

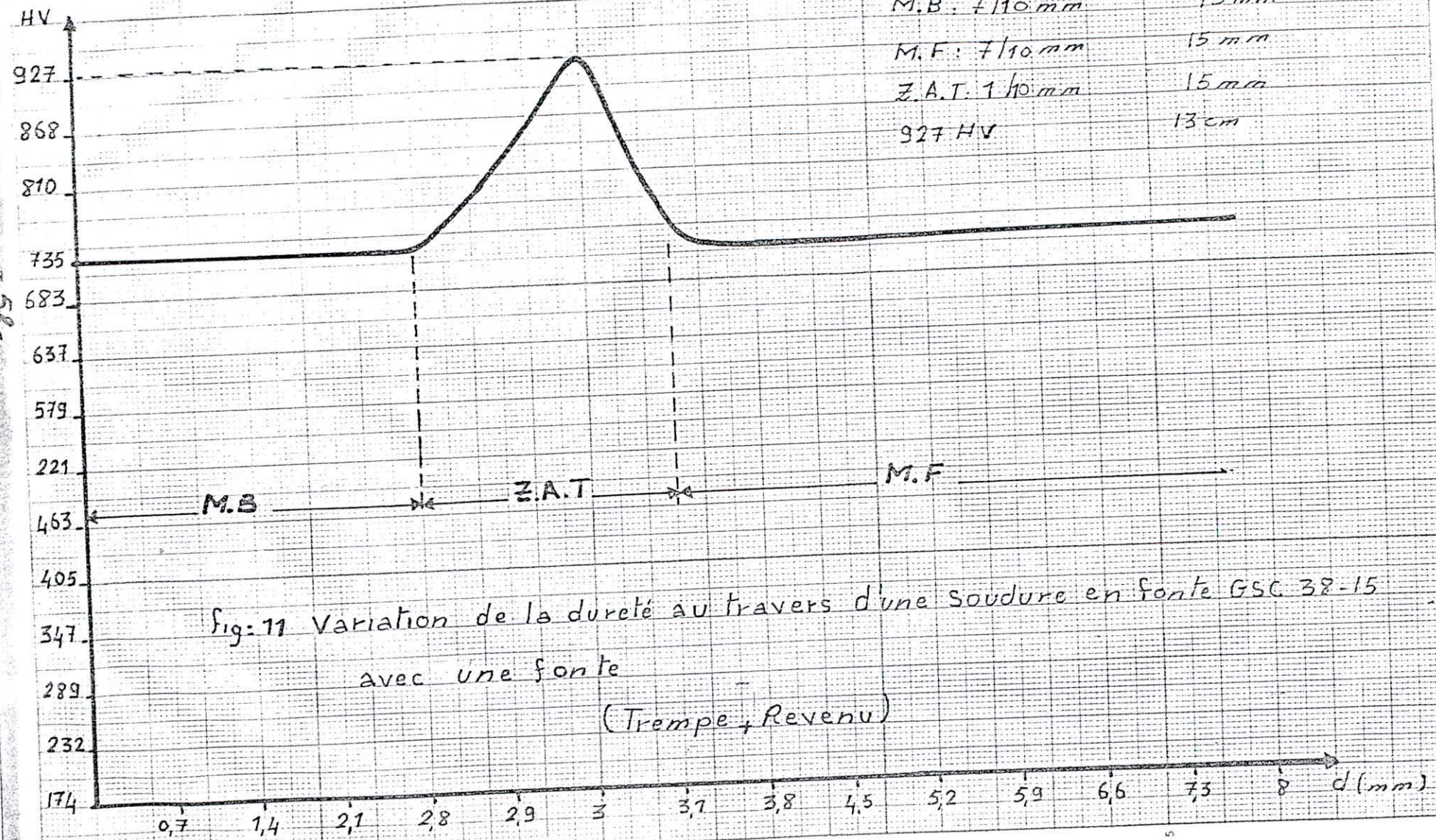
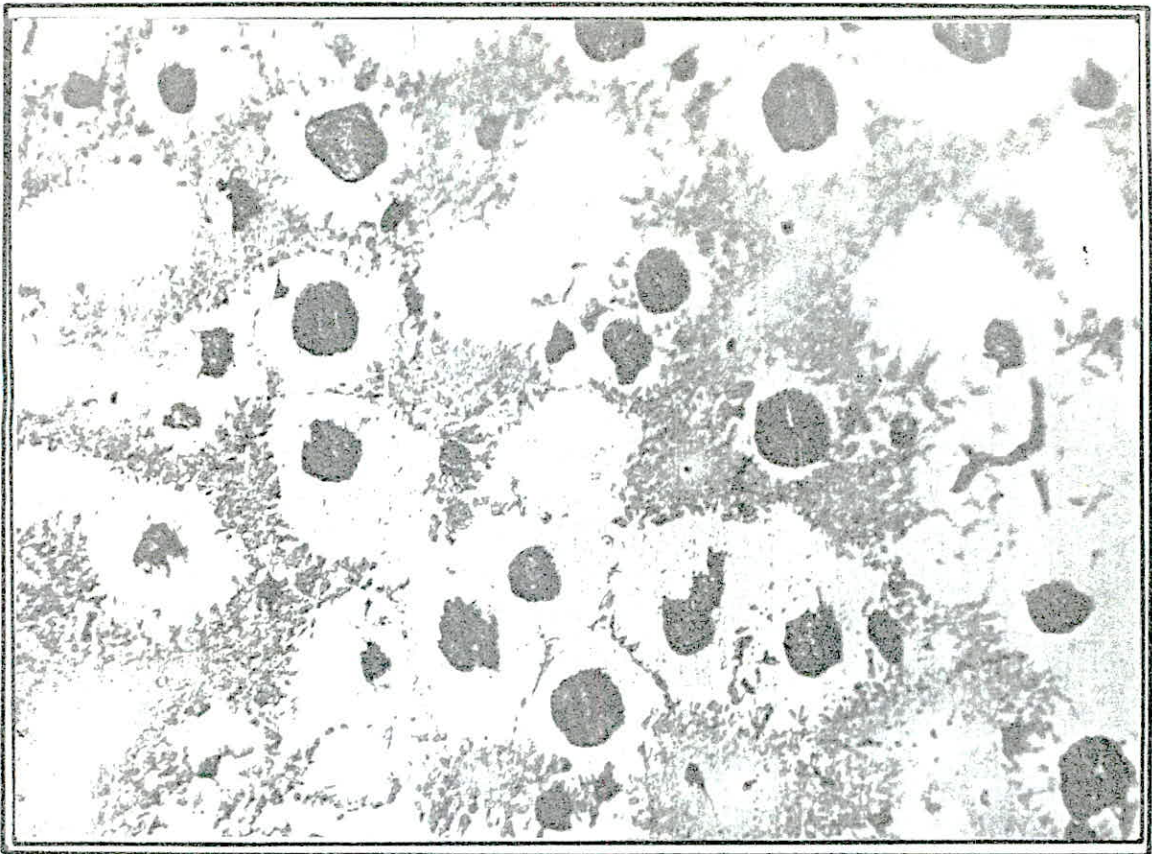


Fig: 11 Variation de la dureté au travers d'une soudure en fonte GSC 38-15  
 avec une fonte  
 (Trempe + Revenu)

(Fig 11)

Soudage de la fonte GSC 38 - 15 avec un acier faiblement allié "Brute de coulée"

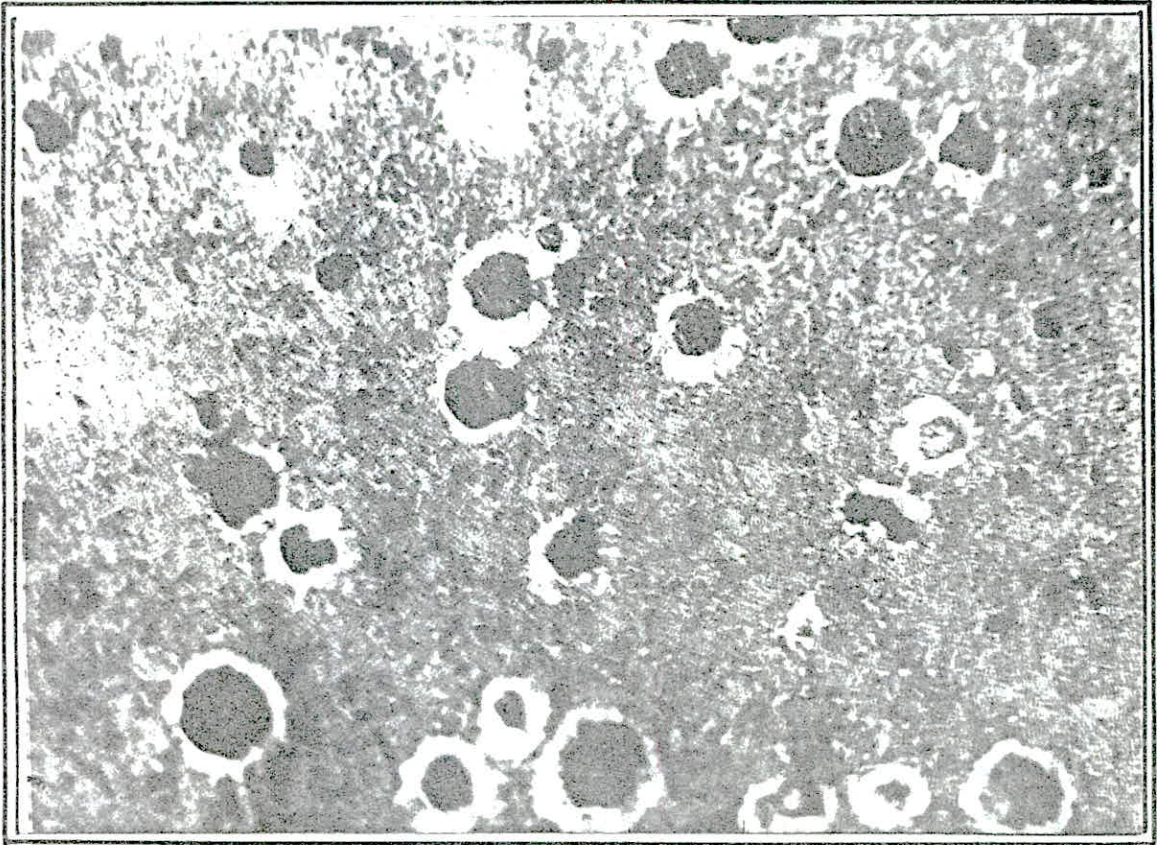


Nital

MB

(a)

X 300



Nital

ZAT

(b)

X 500

(Fig 12)



Soudage de la Fonte GSC 38-15 avec un acier faiblement allié "Brute de coulée"

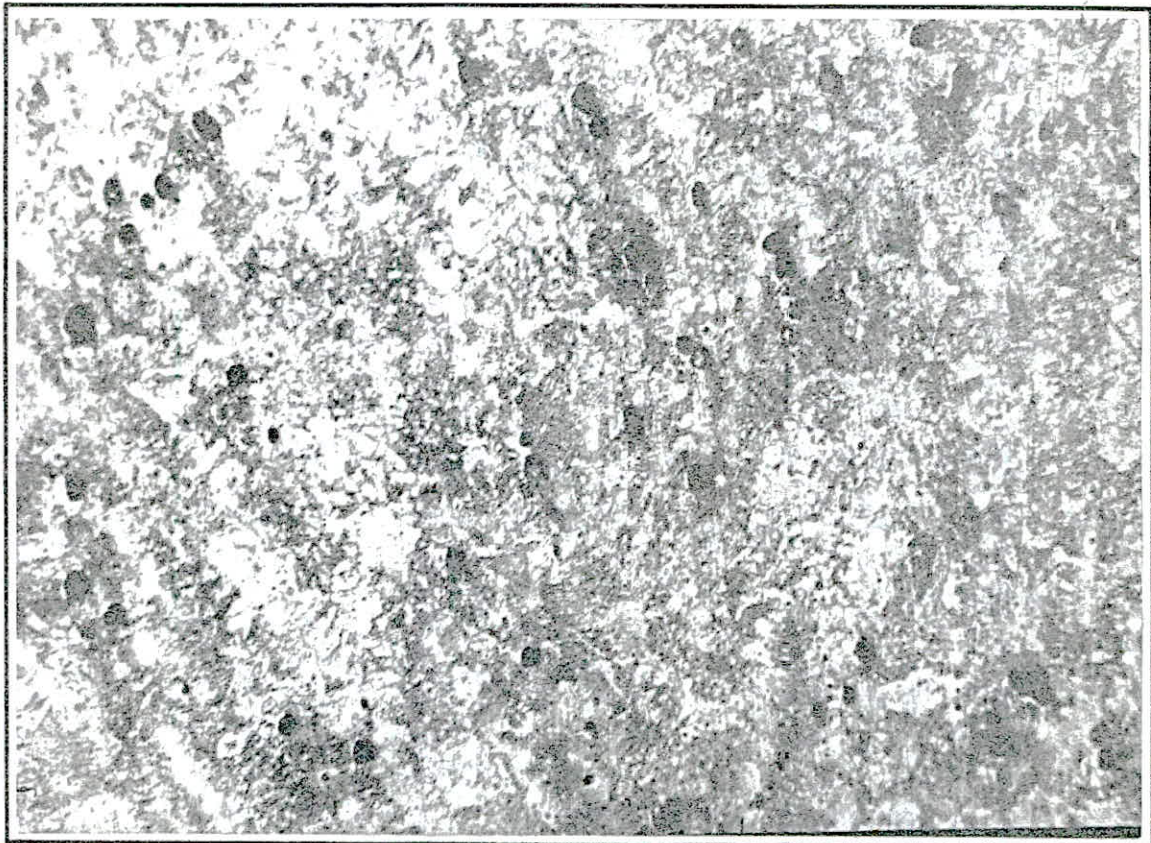


Nital

ZAT\_MF

(c)

X 300

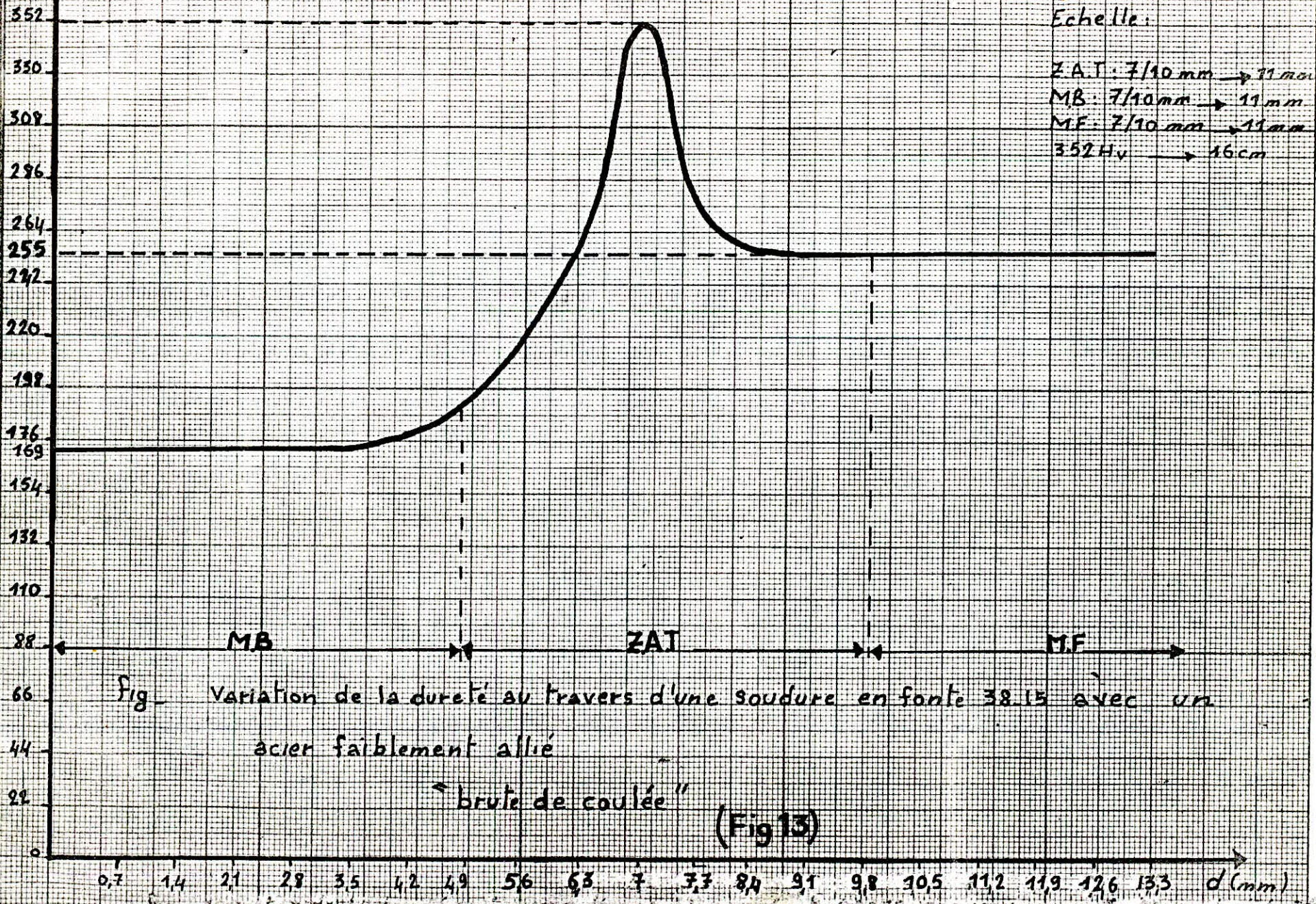


Nital

MF  
(Fig 12)

(d)

X 500

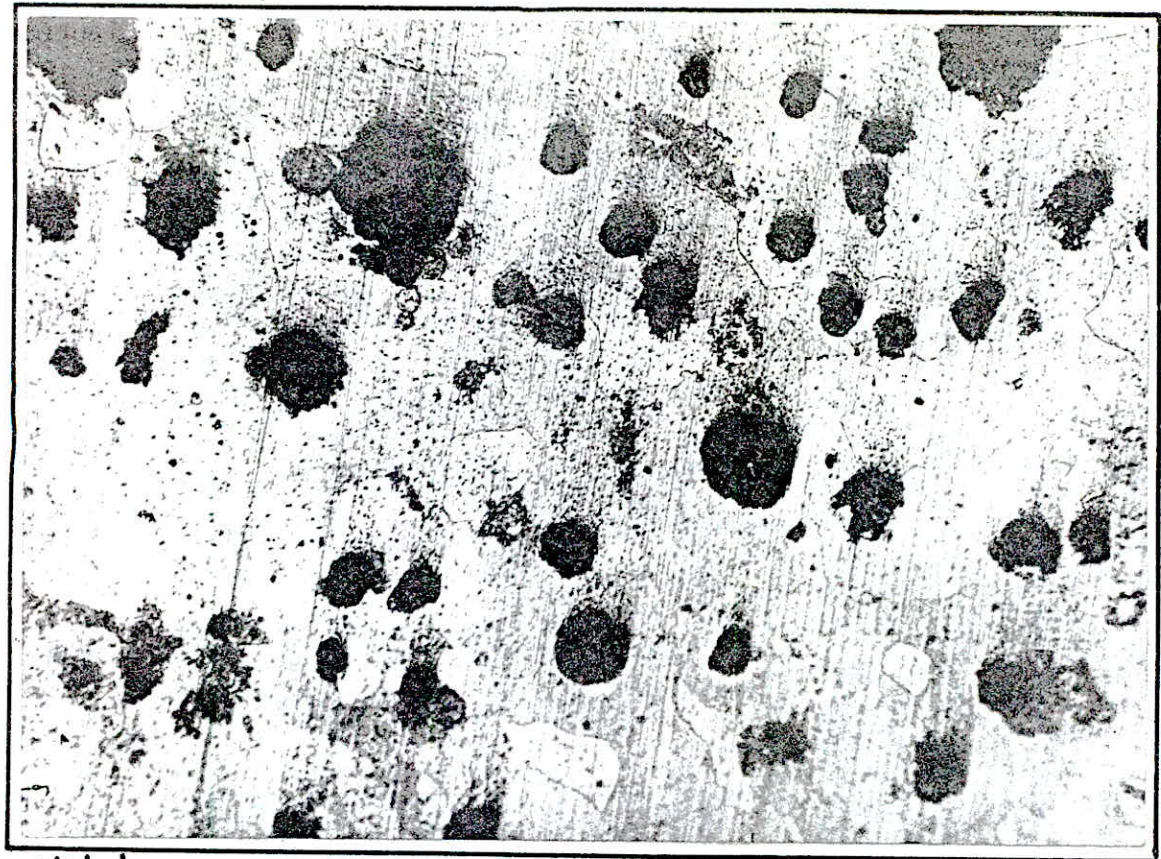


Echelle:  
 Z.A.T. 7/10 mm → 11 mm  
 MB 7/10 mm → 11 mm  
 MF 7/10 mm → 11 mm  
 352 Hv → 16 cm

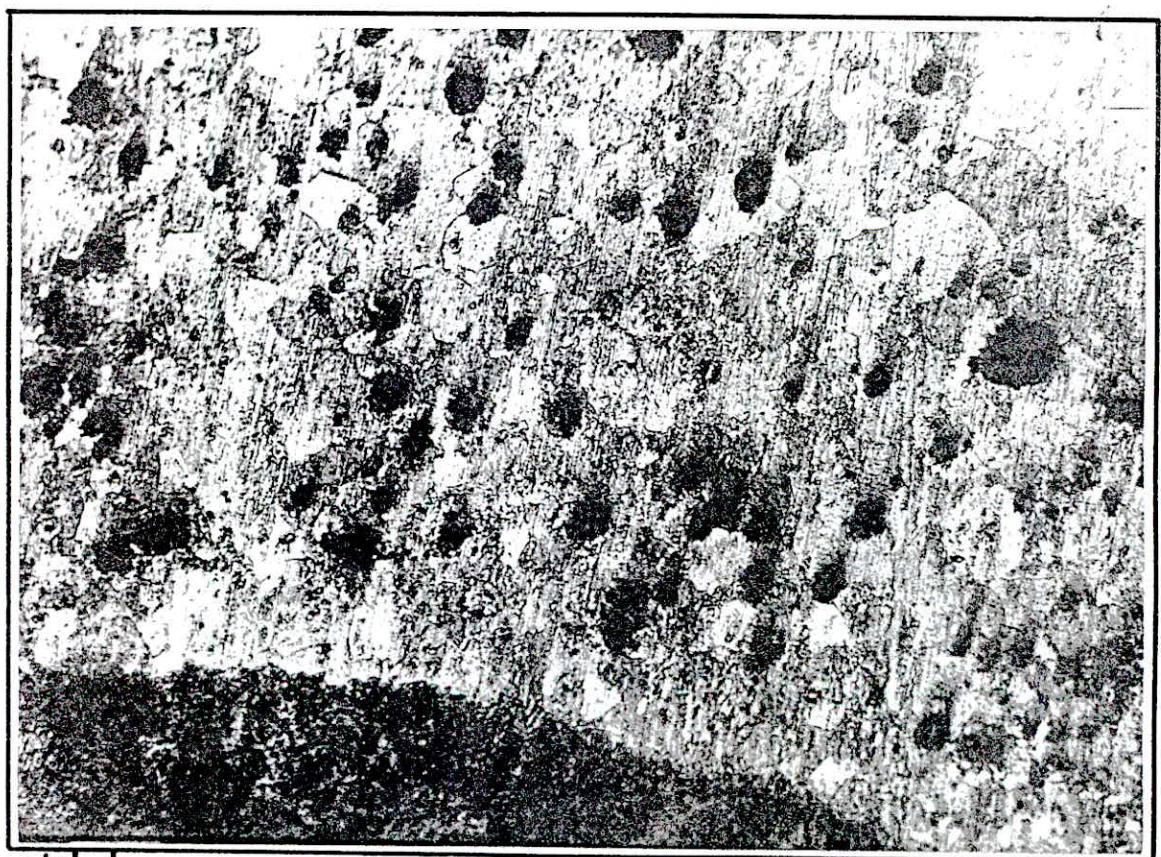
Fig. Variation de la dureté au travers d'une soudure en fonte 38.15 avec un acier faiblement allié "brute de coulée" (Fig 13)

Fig. Variation de la dureté au travers d'une soudure en fonte 38.15 avec un acier faiblement allié "brute de coulée"

Soudage de la fonte GSC38-15 avec un acier faiblement allié "Recuit"



Nital MB (a) X 300



Nital MB\_ZAT (b) X 300

(Fig 14)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier faiblement allié "Recuit"

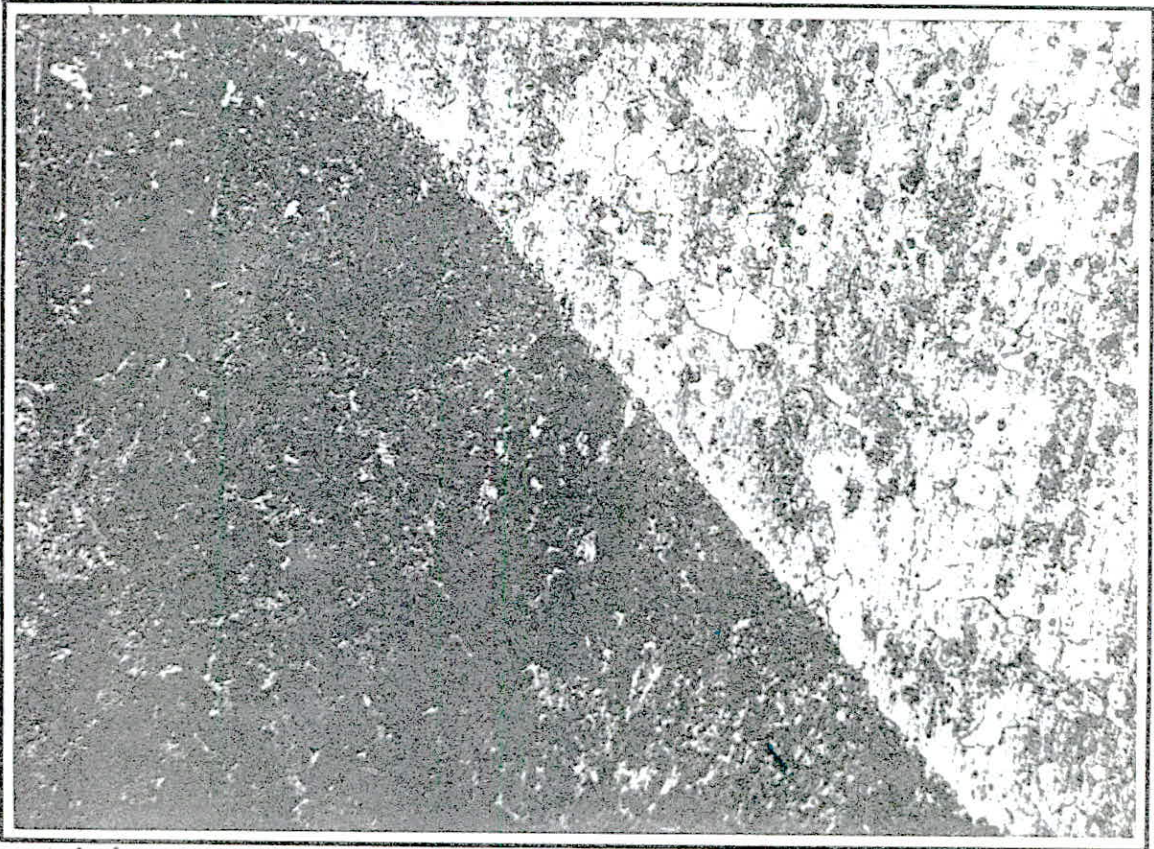


Nital

ZAT

(c)

x 450



Nital

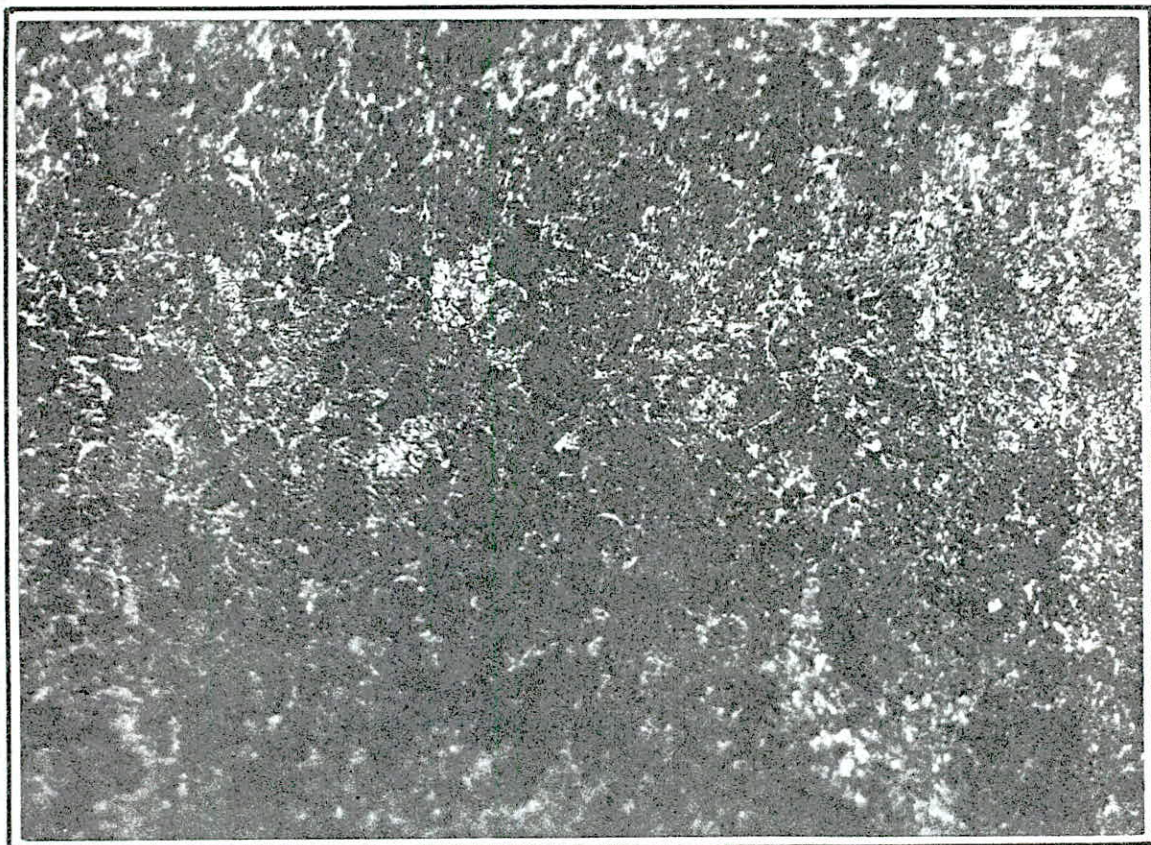
ZAT.MF

(d)

x 350

(Fig 14)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier faiblement allié "Recuit"



Nital

MF

(e)

X 350

(Fig 14)

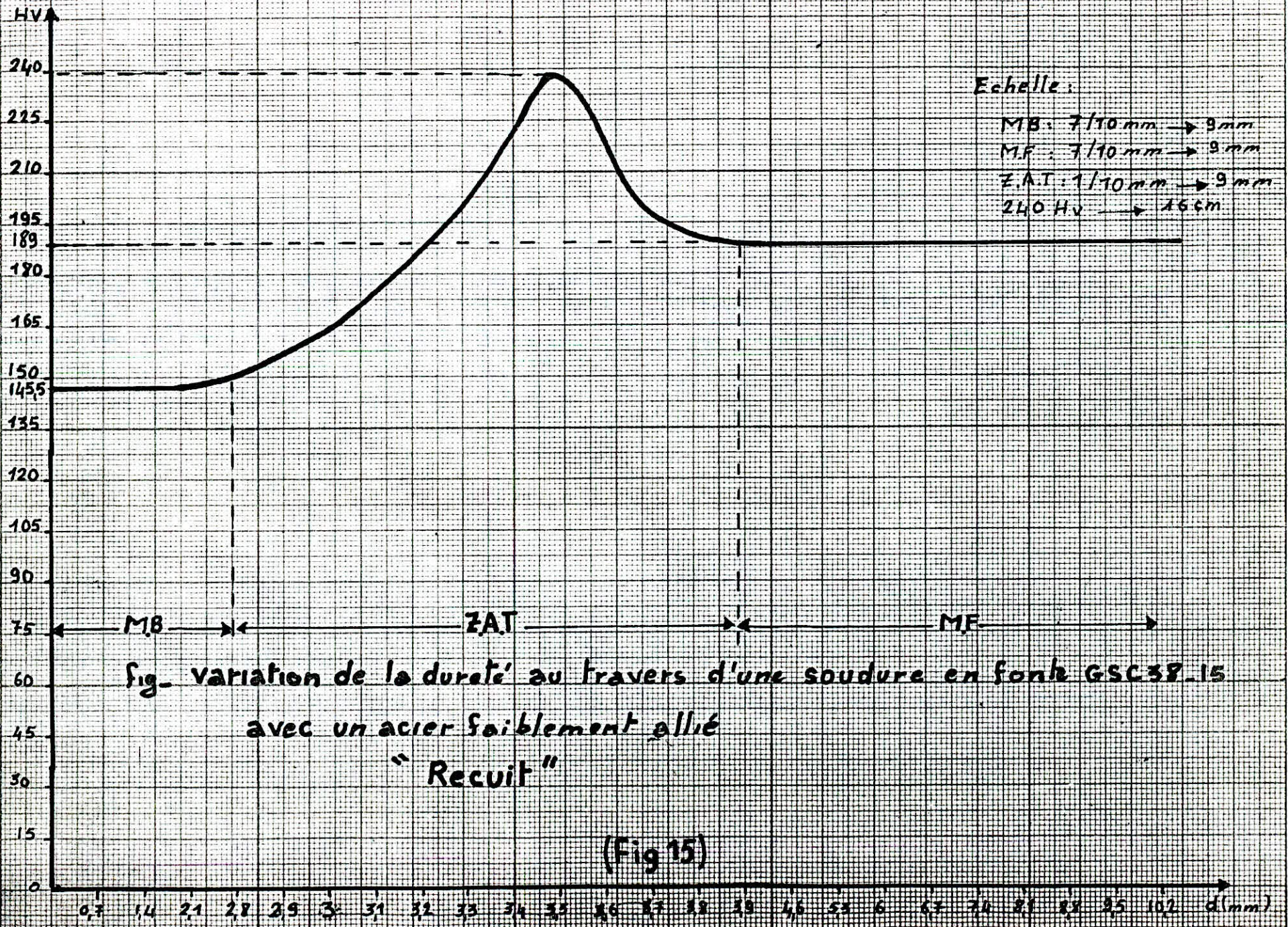
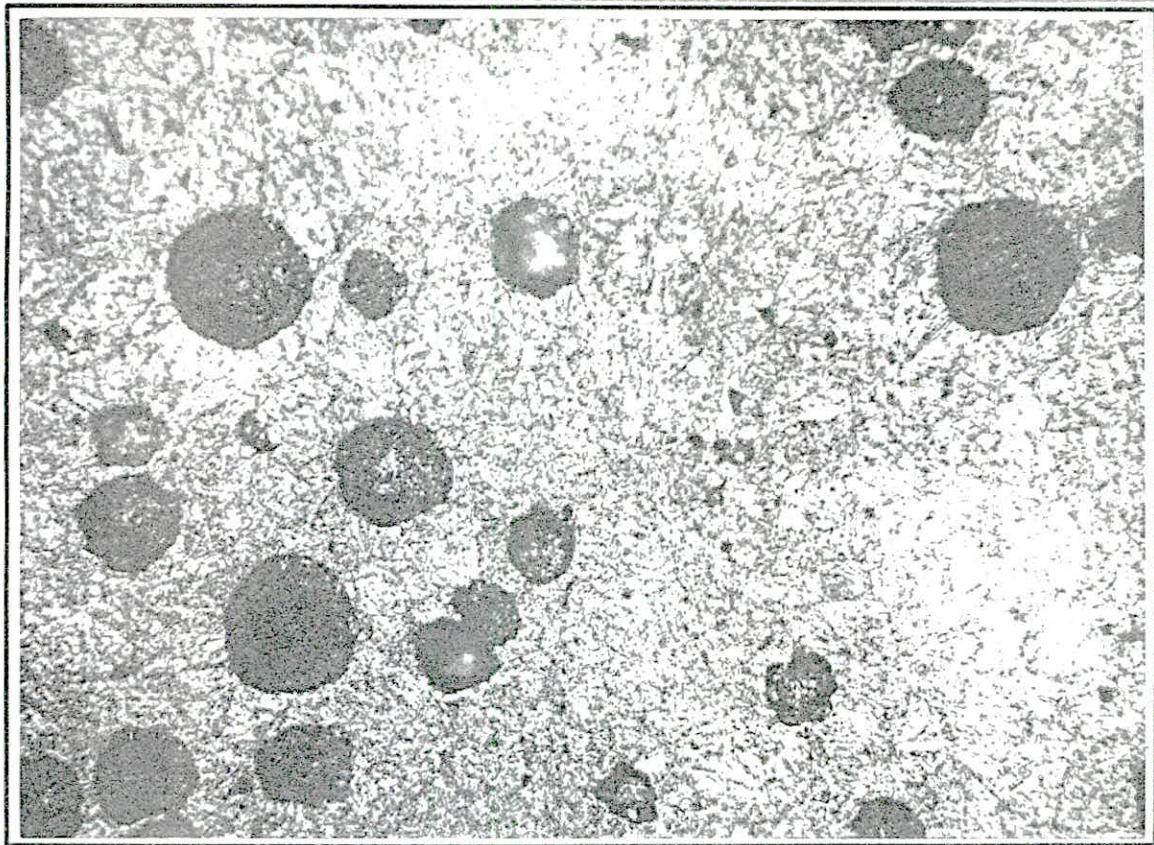


Fig. variation de la dureté au travers d'une soudure en fonte GSC38-15  
 avec un acier faiblement allié  
 "Recuit"

(Fig 15)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier faiblement allié "Trempé + Rev à BT°"

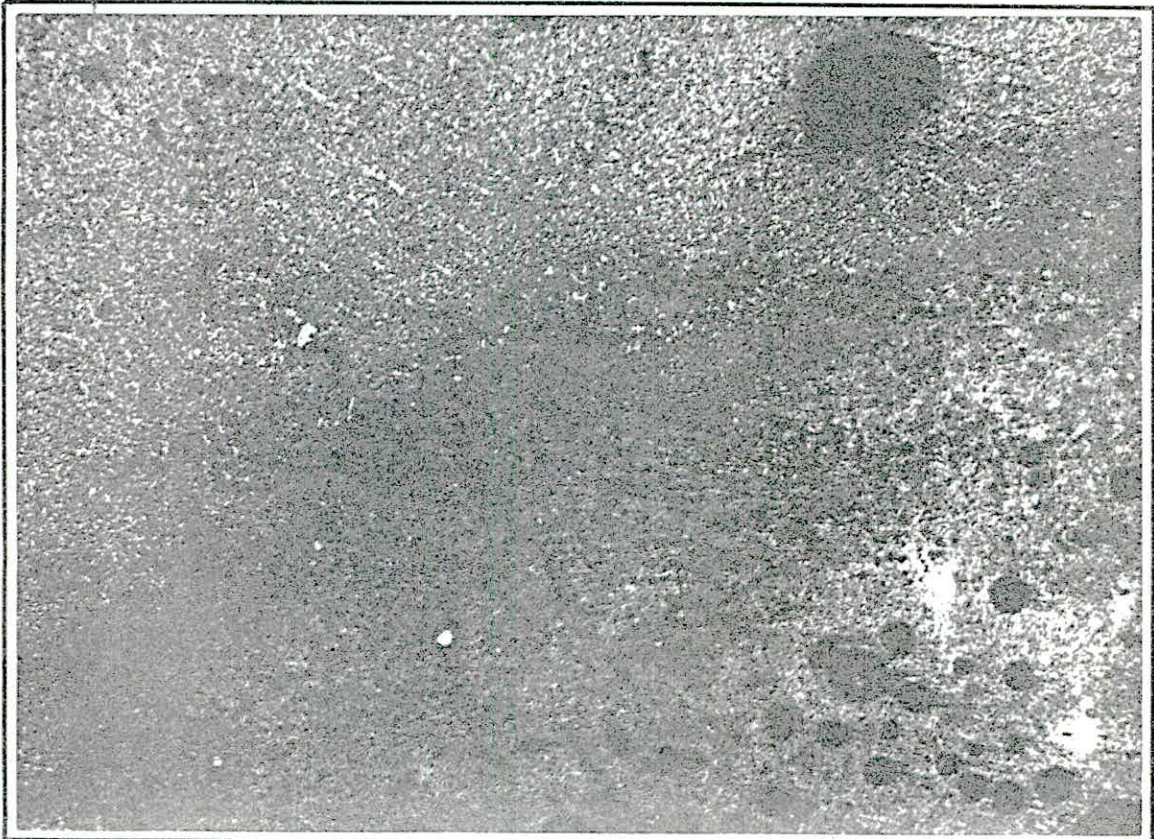


Nital

MB

(a)

x200



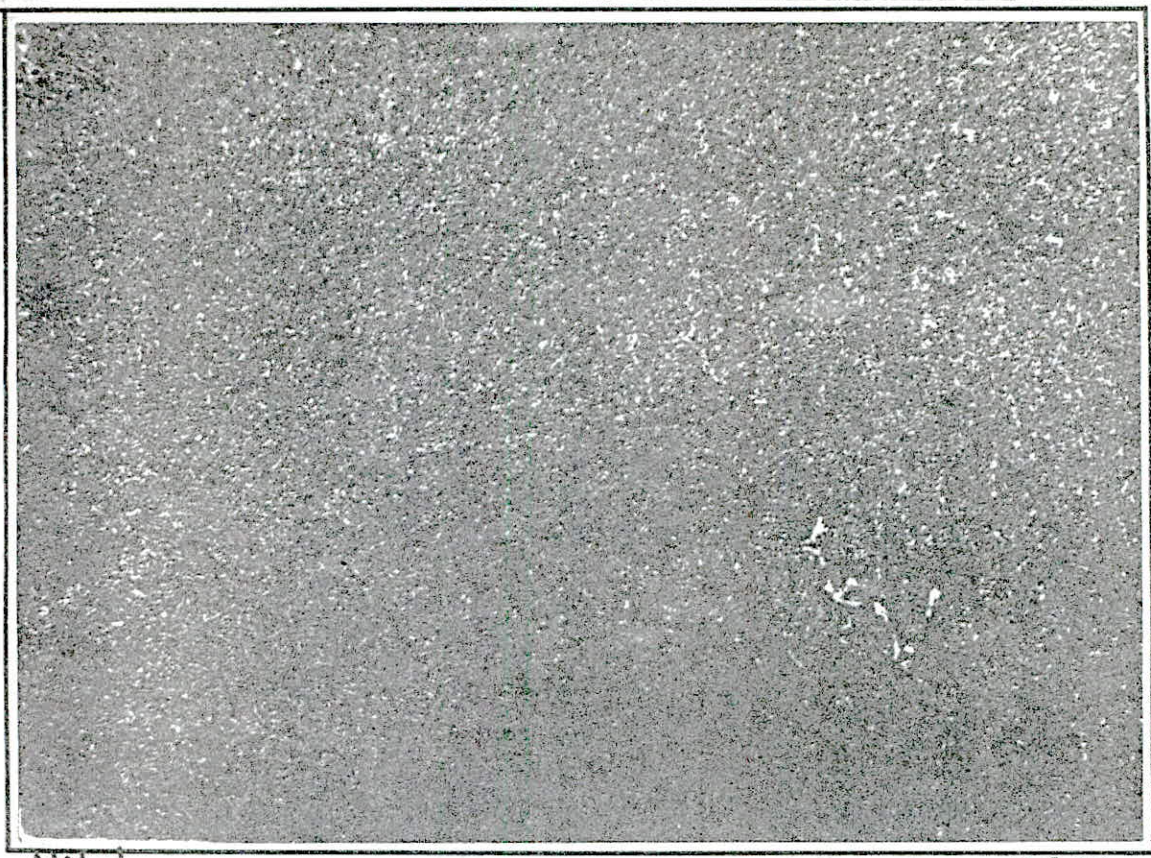
Nital

MB\_ZAT  
(Fig16)

(b)

x200

Soudage de la Fonte GSC 38-15 avec un acier faiblement allié "Trempe + Rev à BT°"

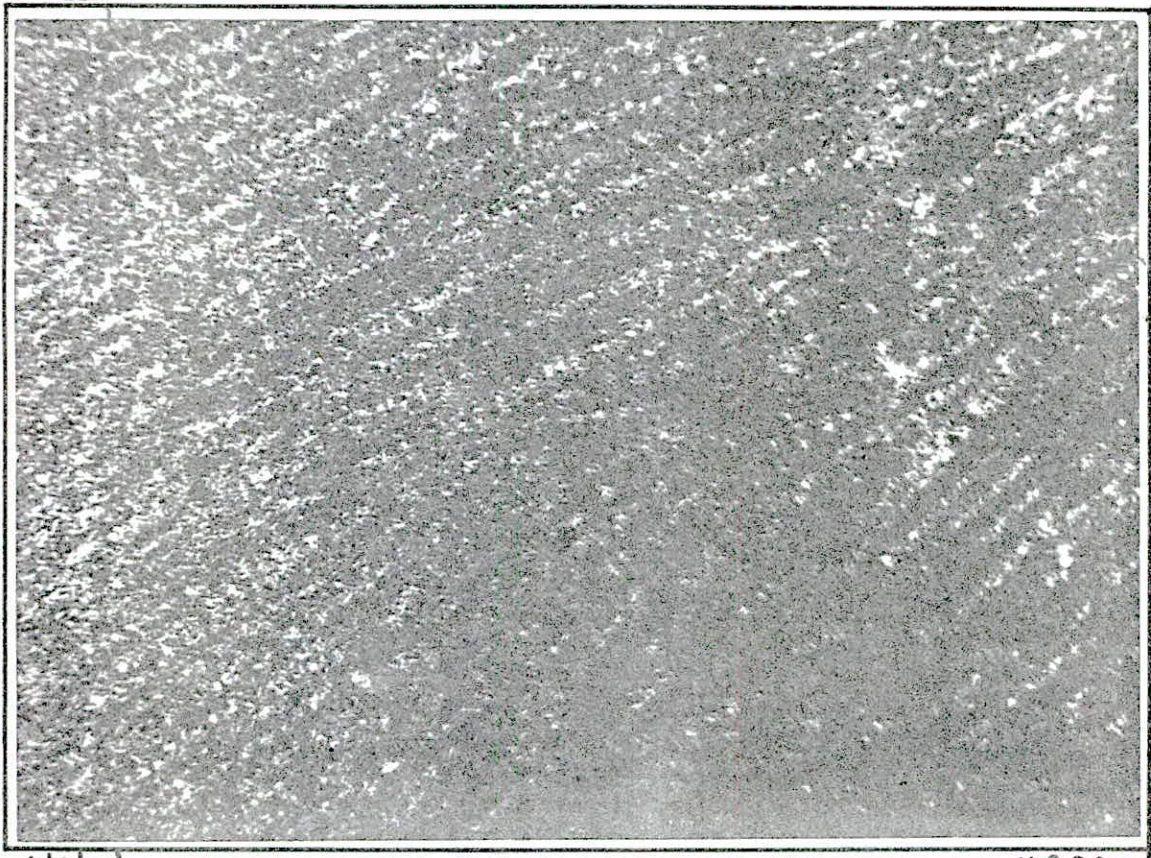


Nital

ZAT

(c)

X 200



Nital

MF

(d)

X 200

(Fig 16)



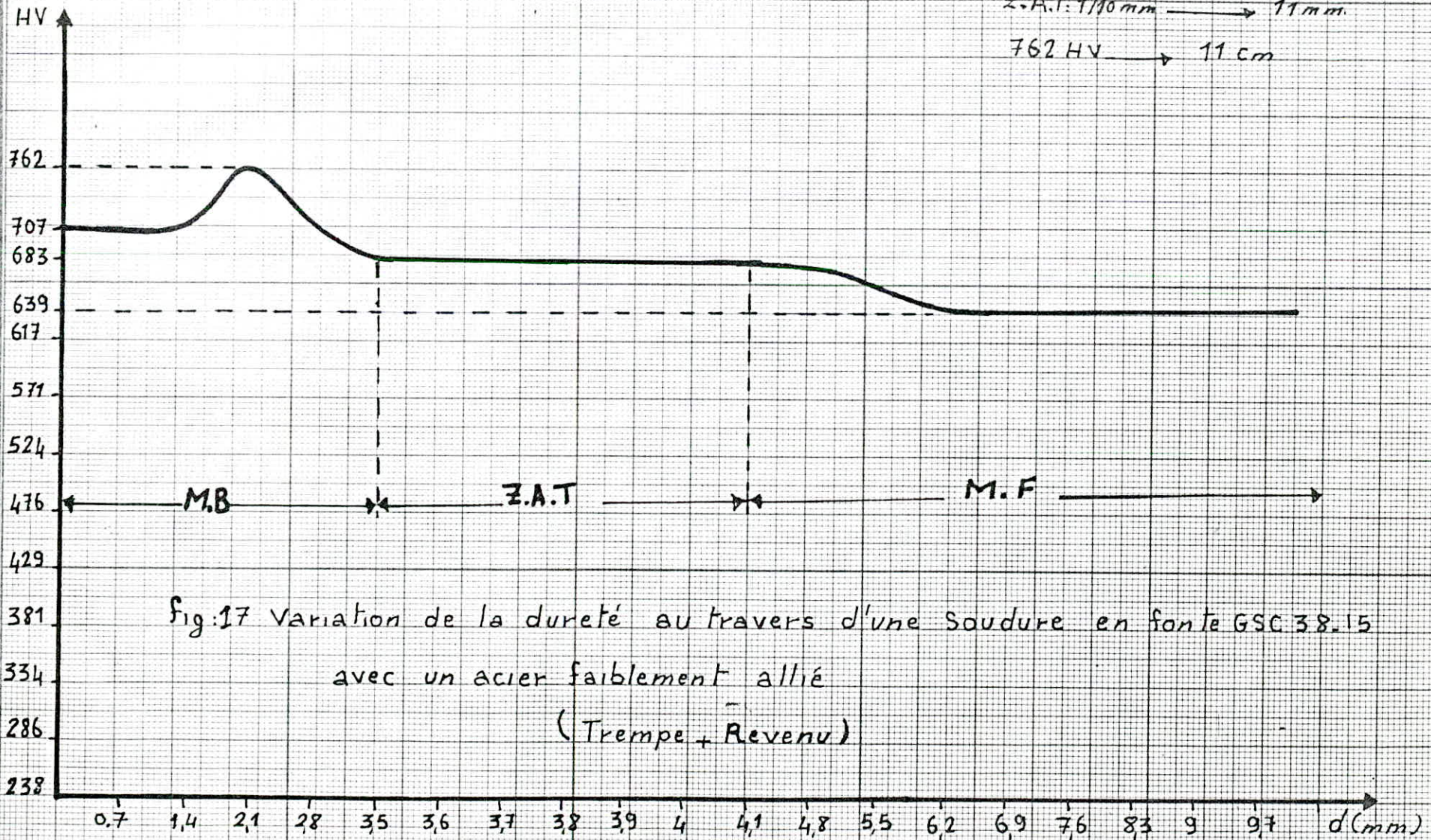
Echelle:

M.B: 7/10 mm → 11 mm

M.F: 7/10 mm → 11 mm

Z.A.T: 1/10 mm → 11 mm

762 HV → 11 cm



(Fig 17)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier INOX "Brute de coulée"

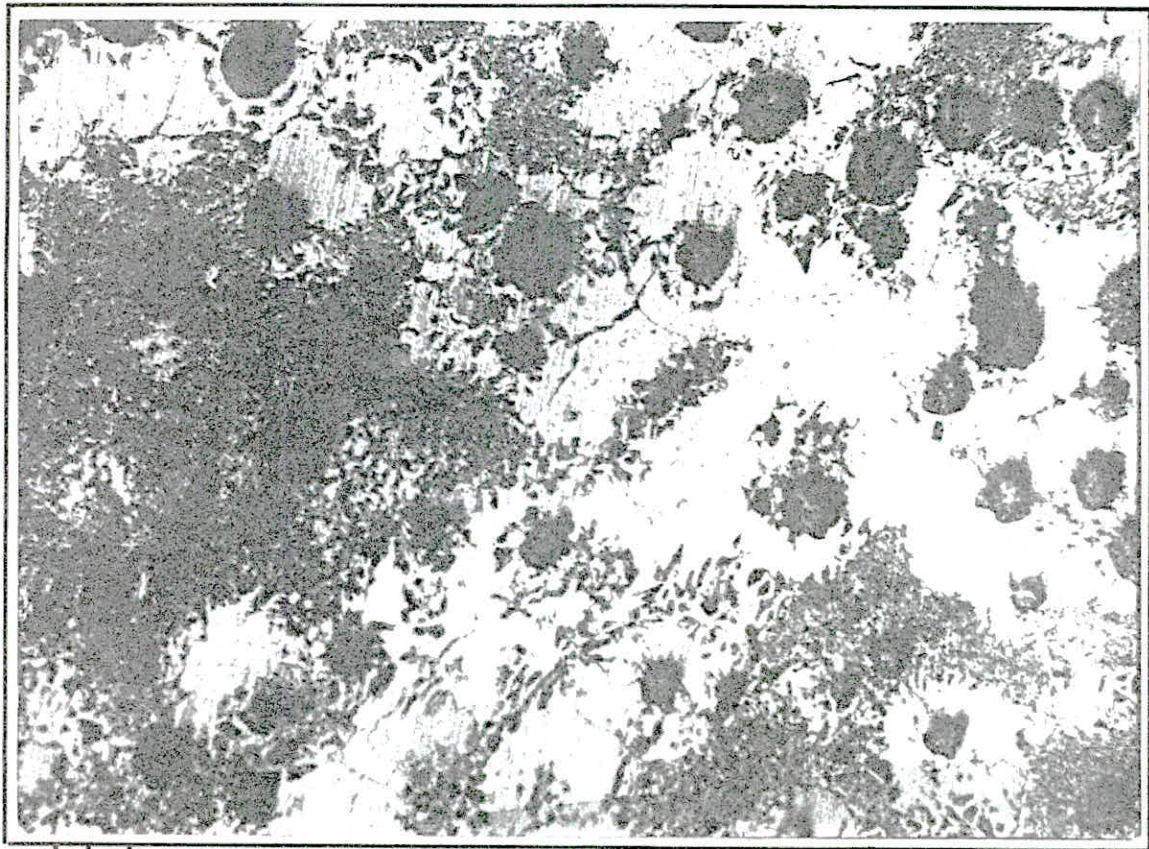


Nital

MB

(a)

X450



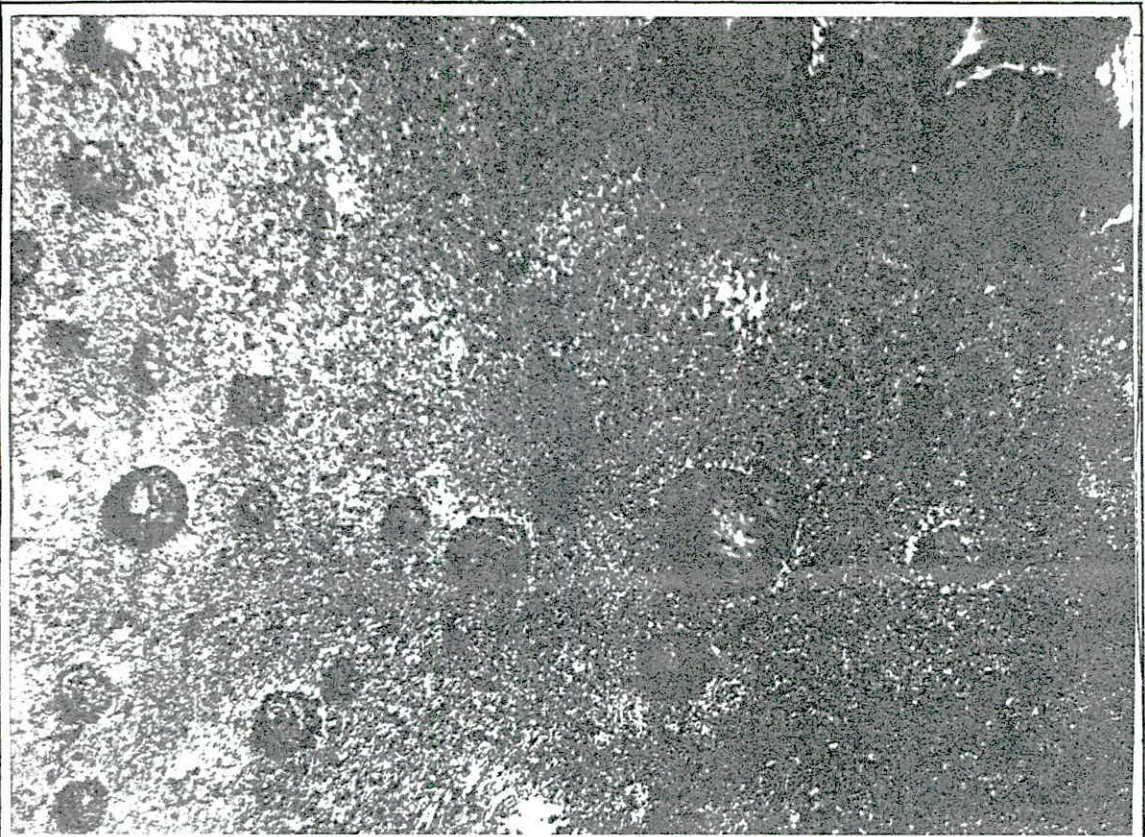
Nital

MB\_ZAT  
(Fig 18)

(b)

X450

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier INOX "Brute de coulée"



Nital

ZAT

(c)

X450



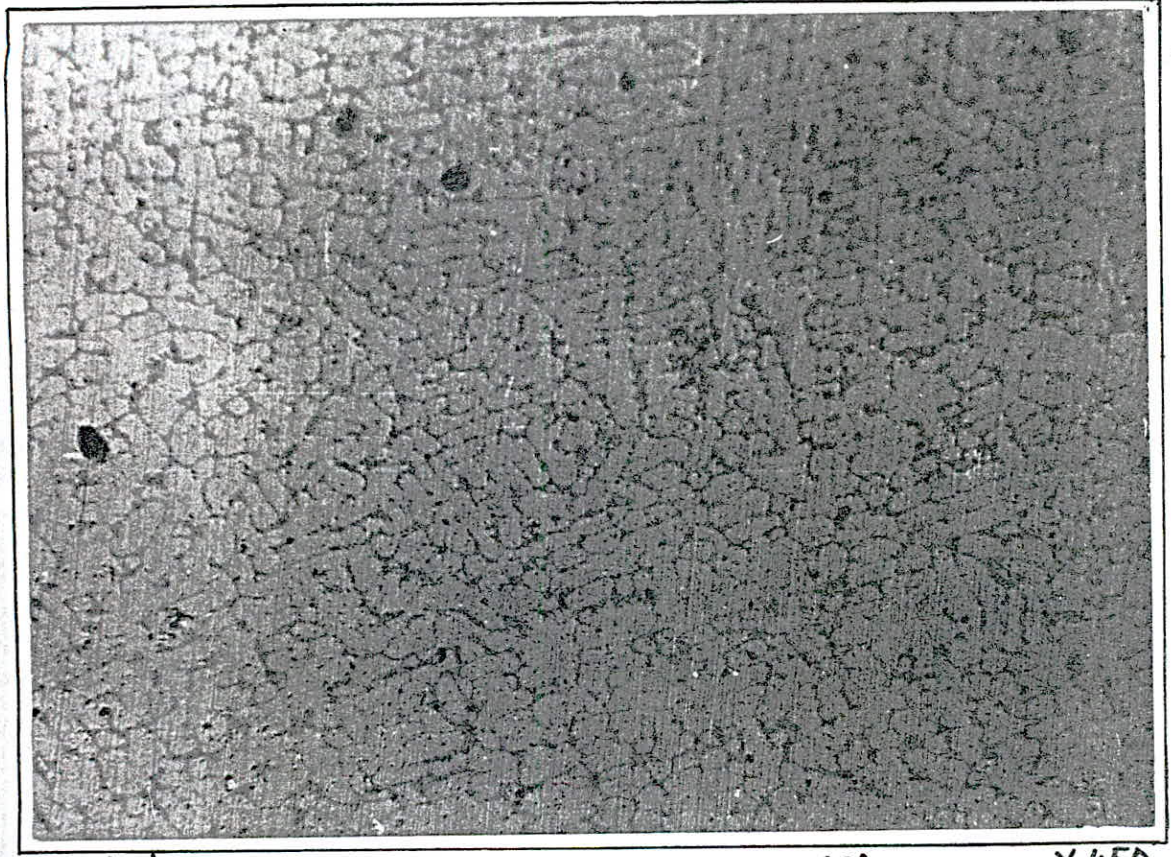
Nital

ZAT-MF  
(Fig 18)

(d)

X450

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier INOX "Brute de coulée"



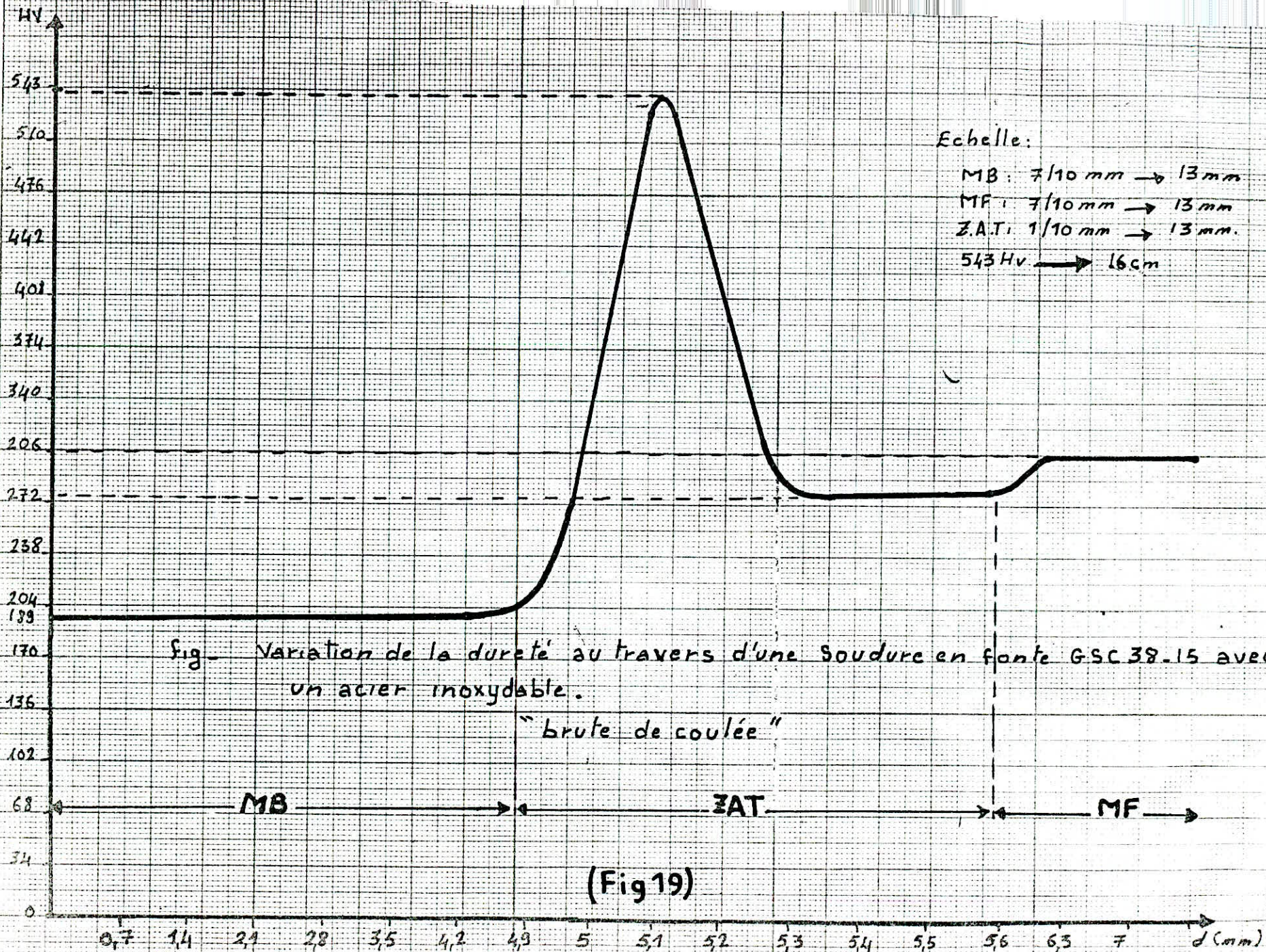
Nital

MF

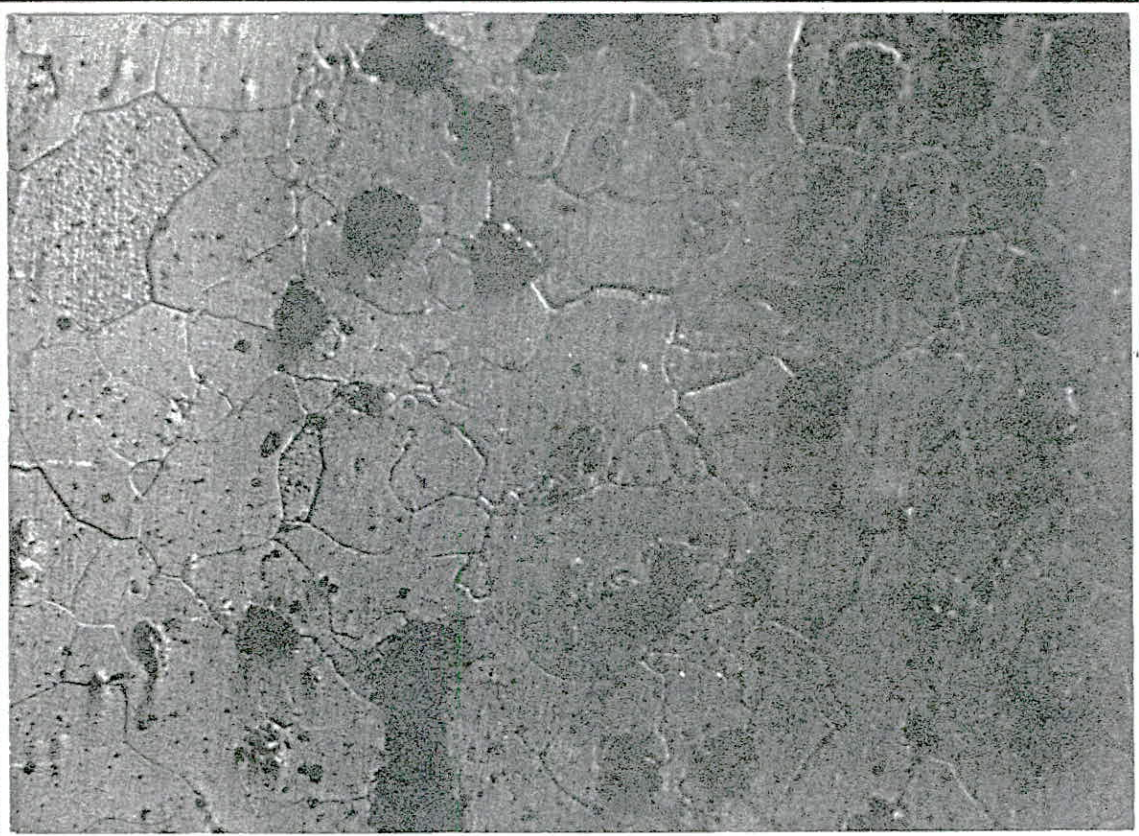
(e)

X450

(Fig18)



Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier INOX "Recuit"

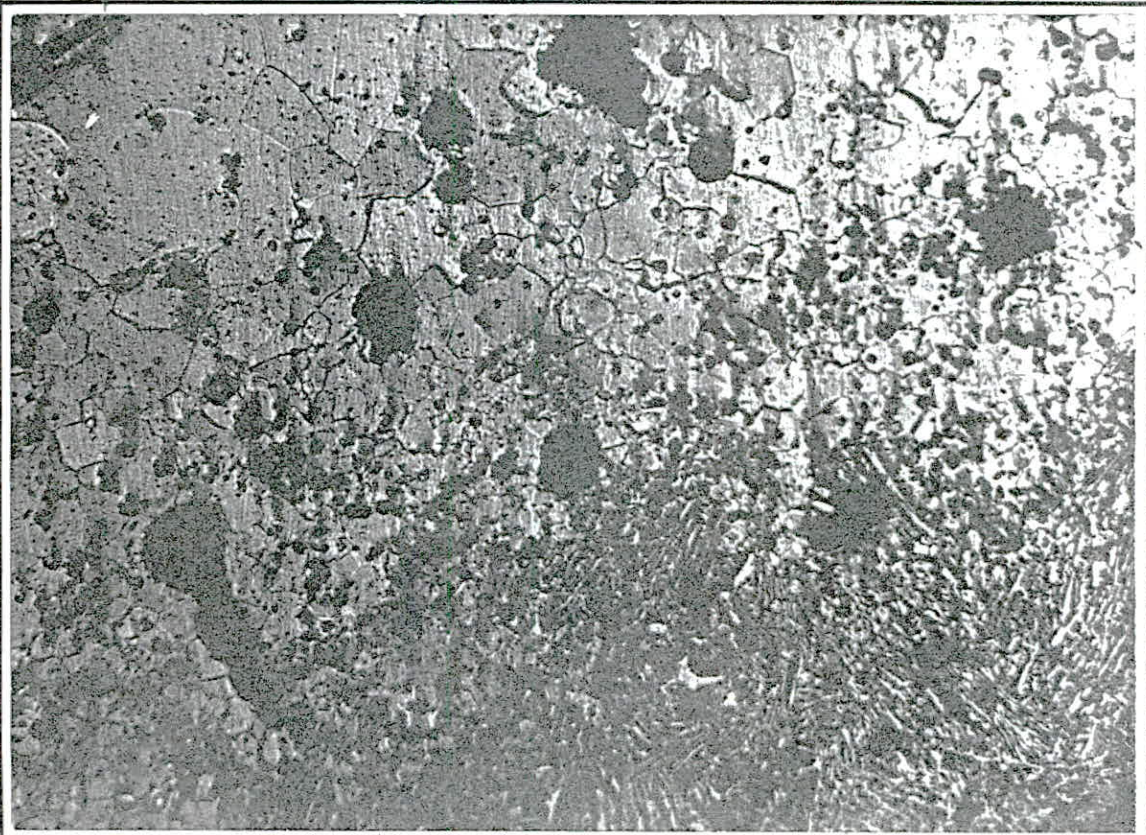


Nital

MB

(a)

X450



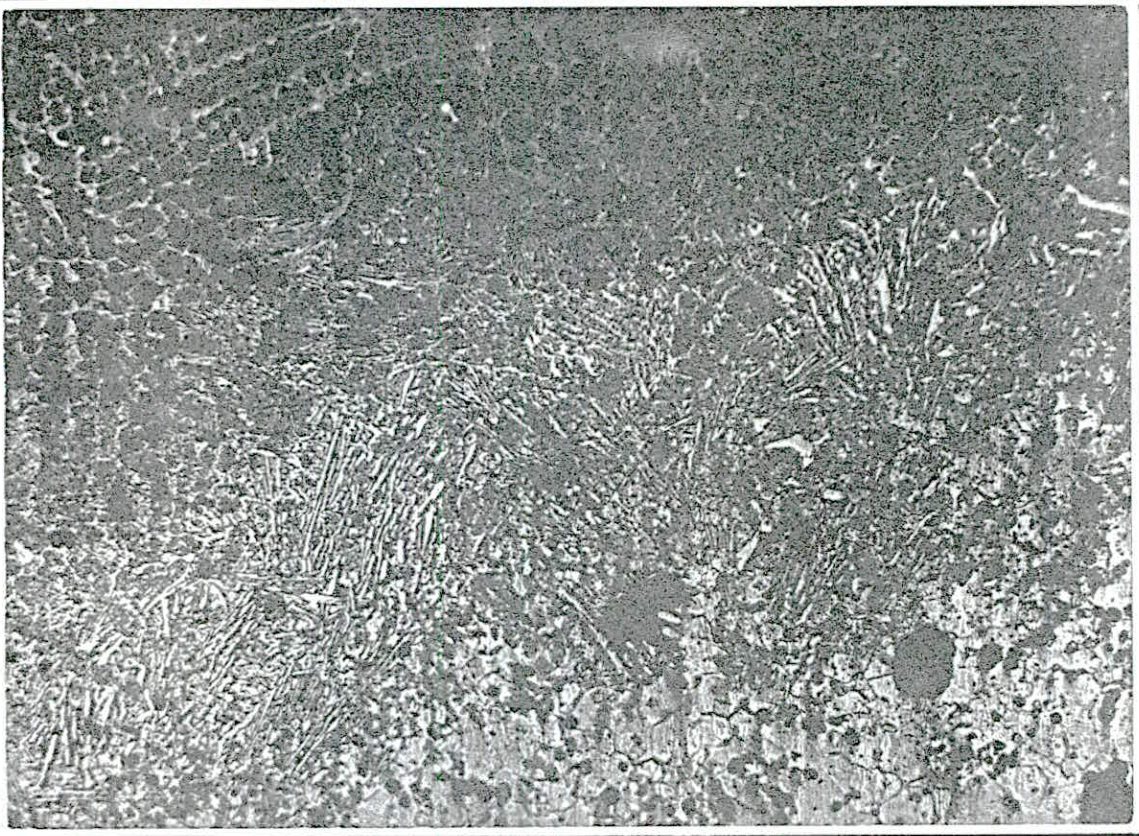
Nital

MB - ZAT  
(Fig 20)

(b)

X450

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier INOX "Recuit"

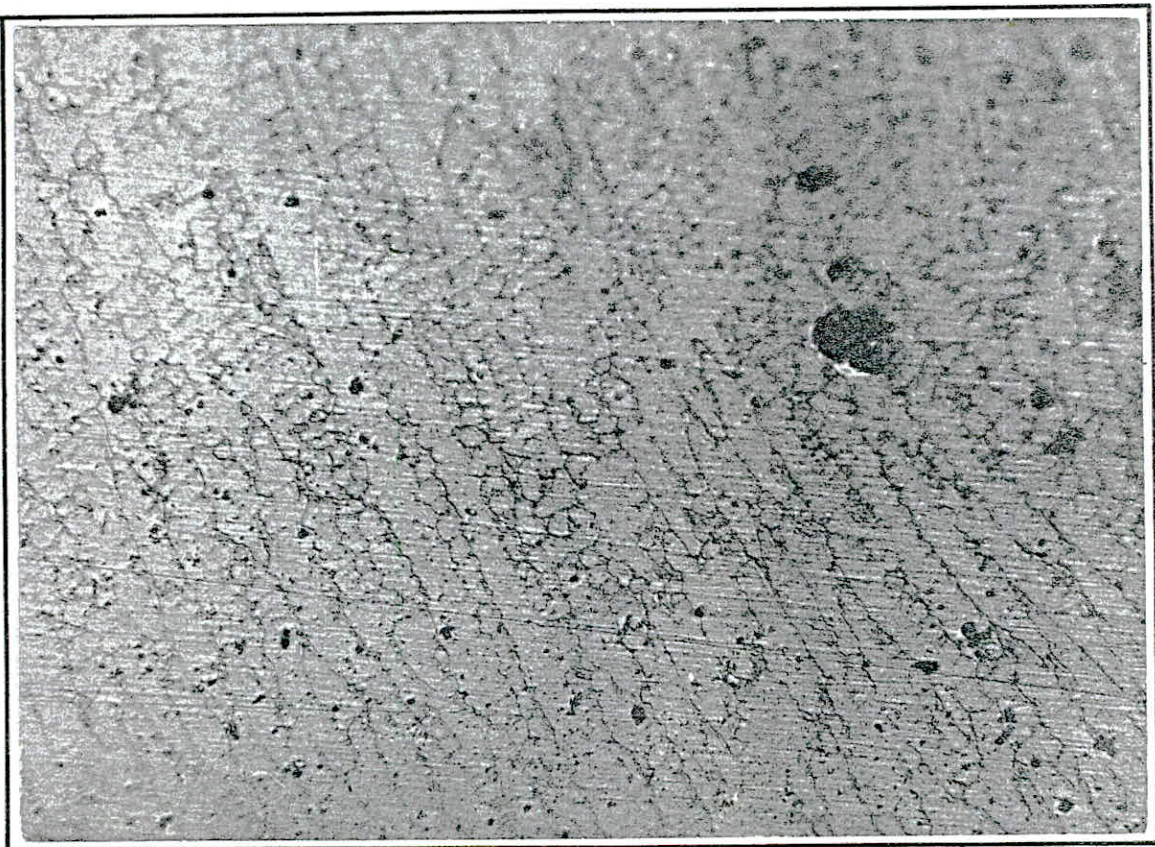


Nital ZAT (c) X550



Nital ZAT - MF (d) X450  
(Fig 20)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier INOX "Recuit"



Nital

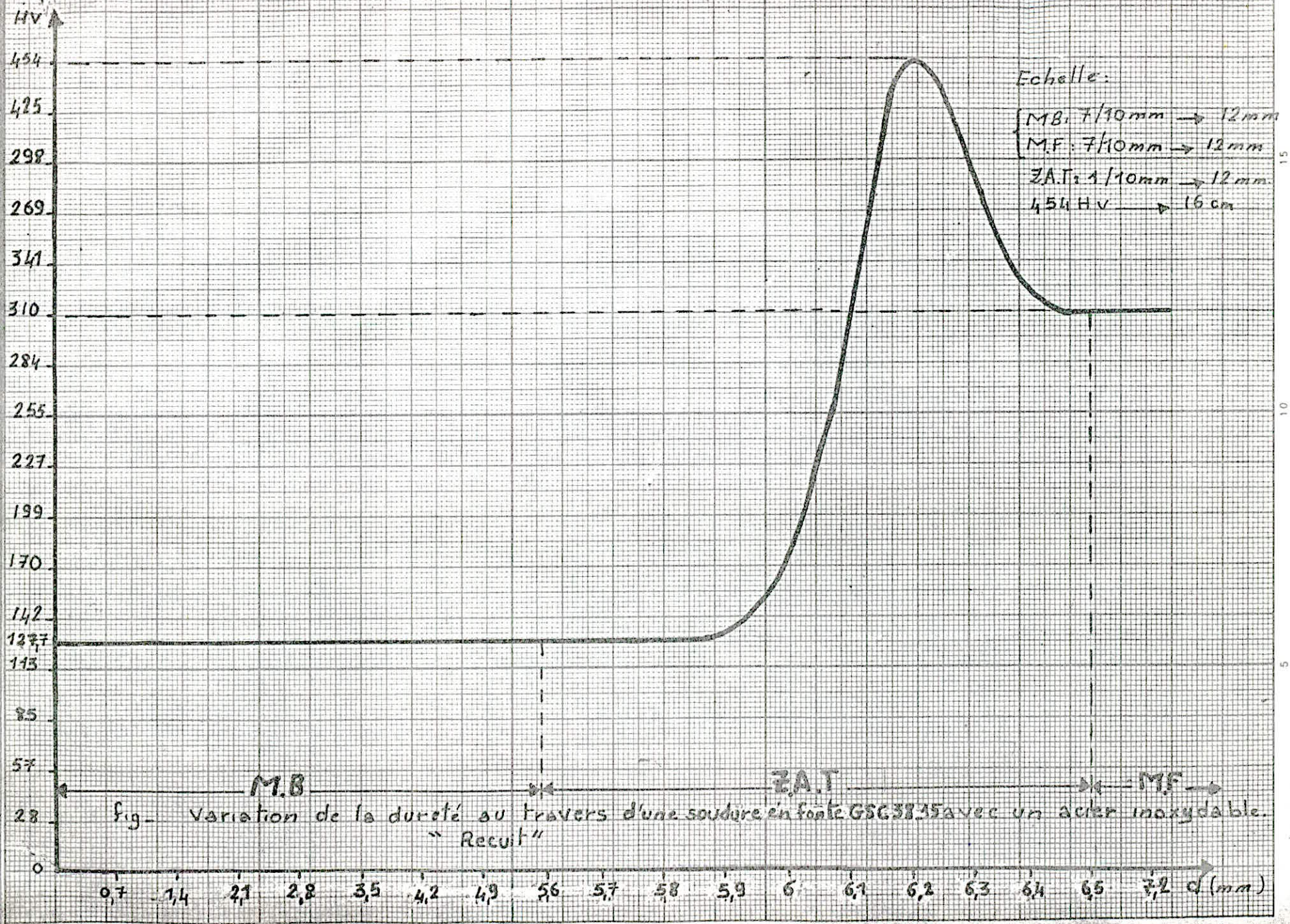
MF

(c)

X450

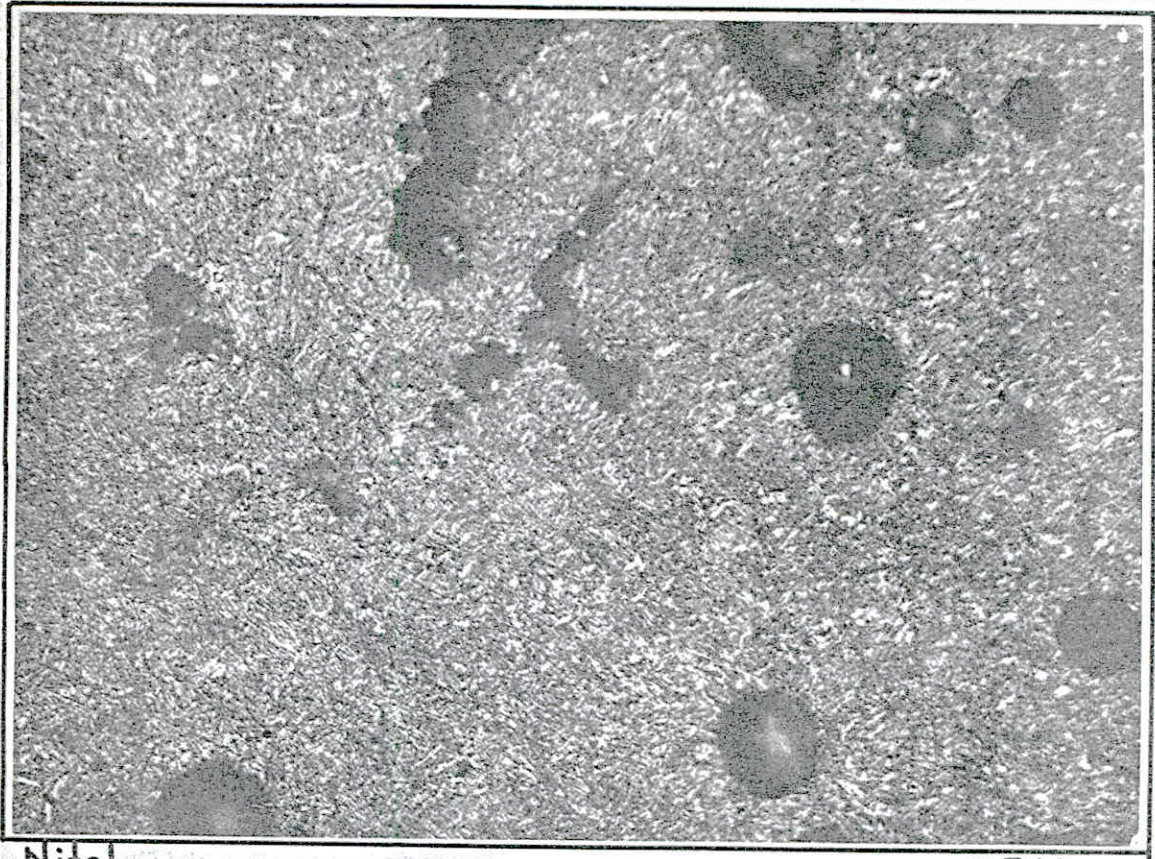
(Fig 20)





(Fig 21)

Soudage de la fonte GSC38-15 avec un acier INOX "Trempe + Rev à B.T."

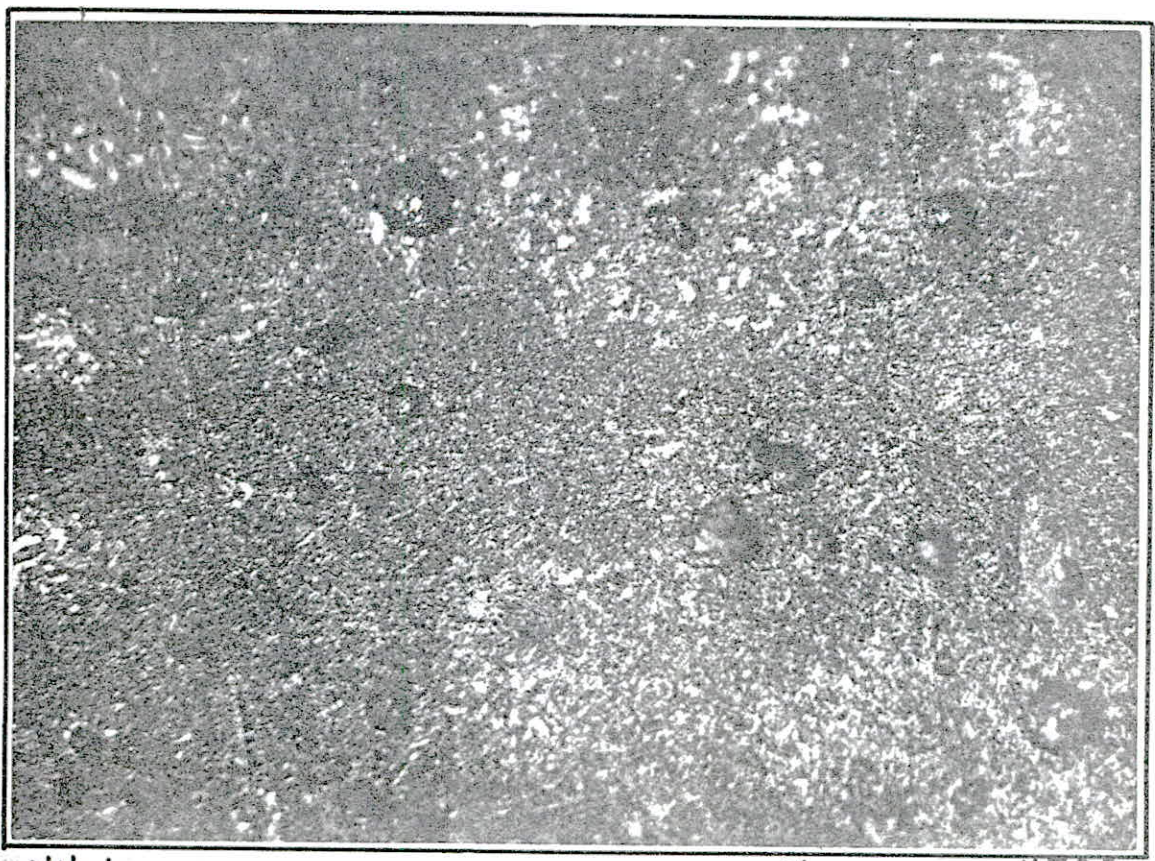


Nital

MB

(a)

X300



Nital

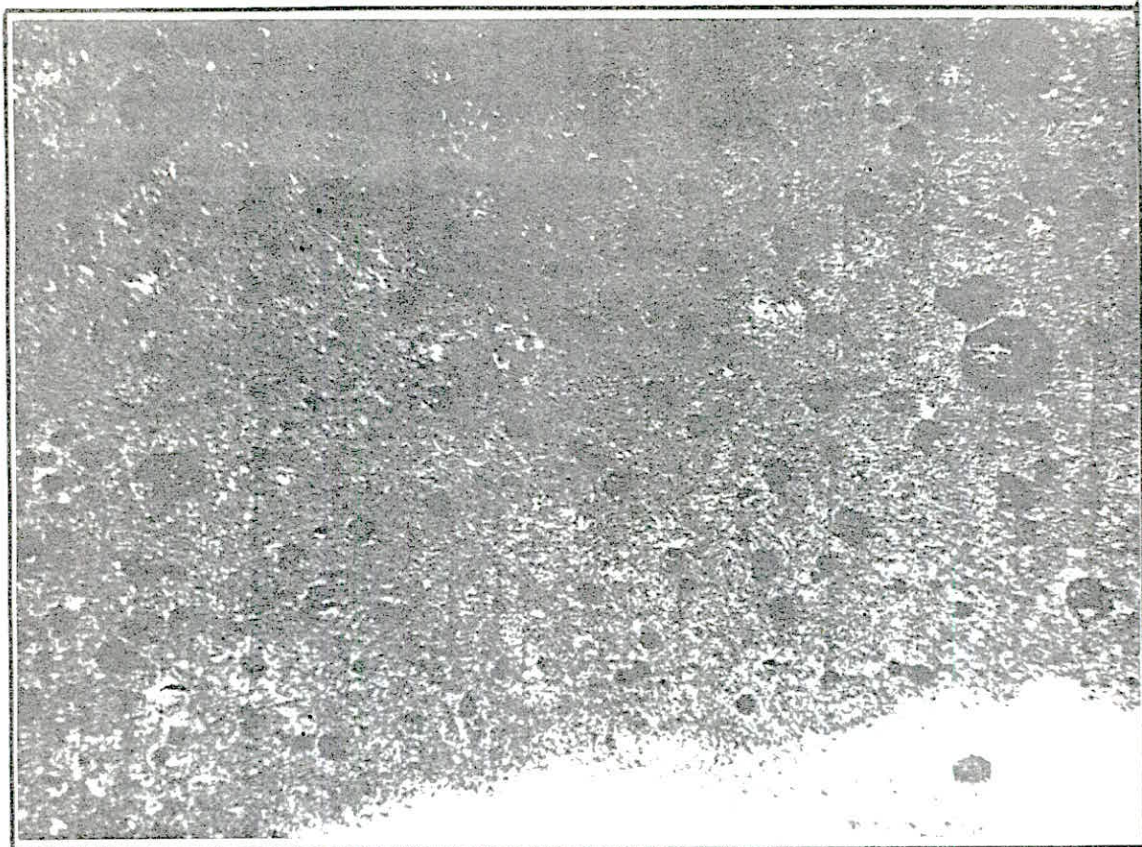
ZAT

(b)

X300

(Fig 22)

Soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier INOX " Trempe + Rev à B.T<sup>o</sup> "

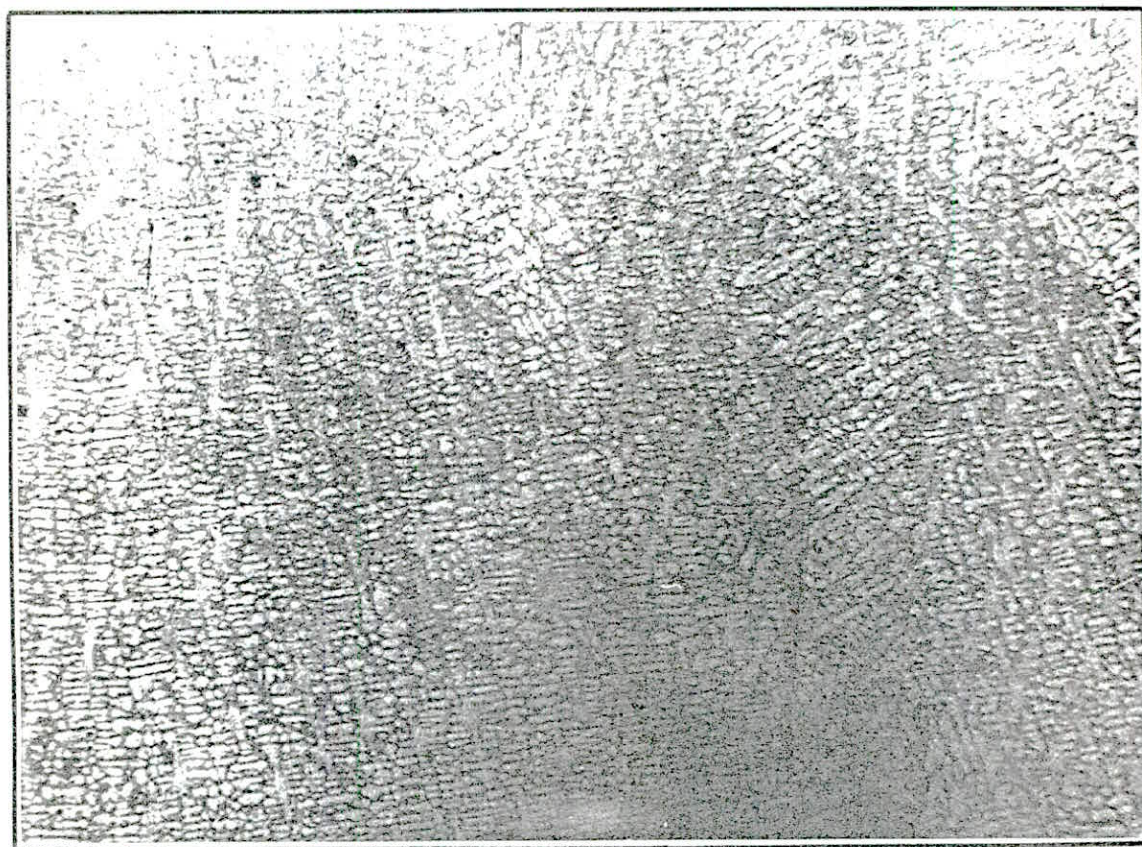


Nital

ZAT-MF

(c)

X300



Nital

MF

(d)

X300

(Fig 22)

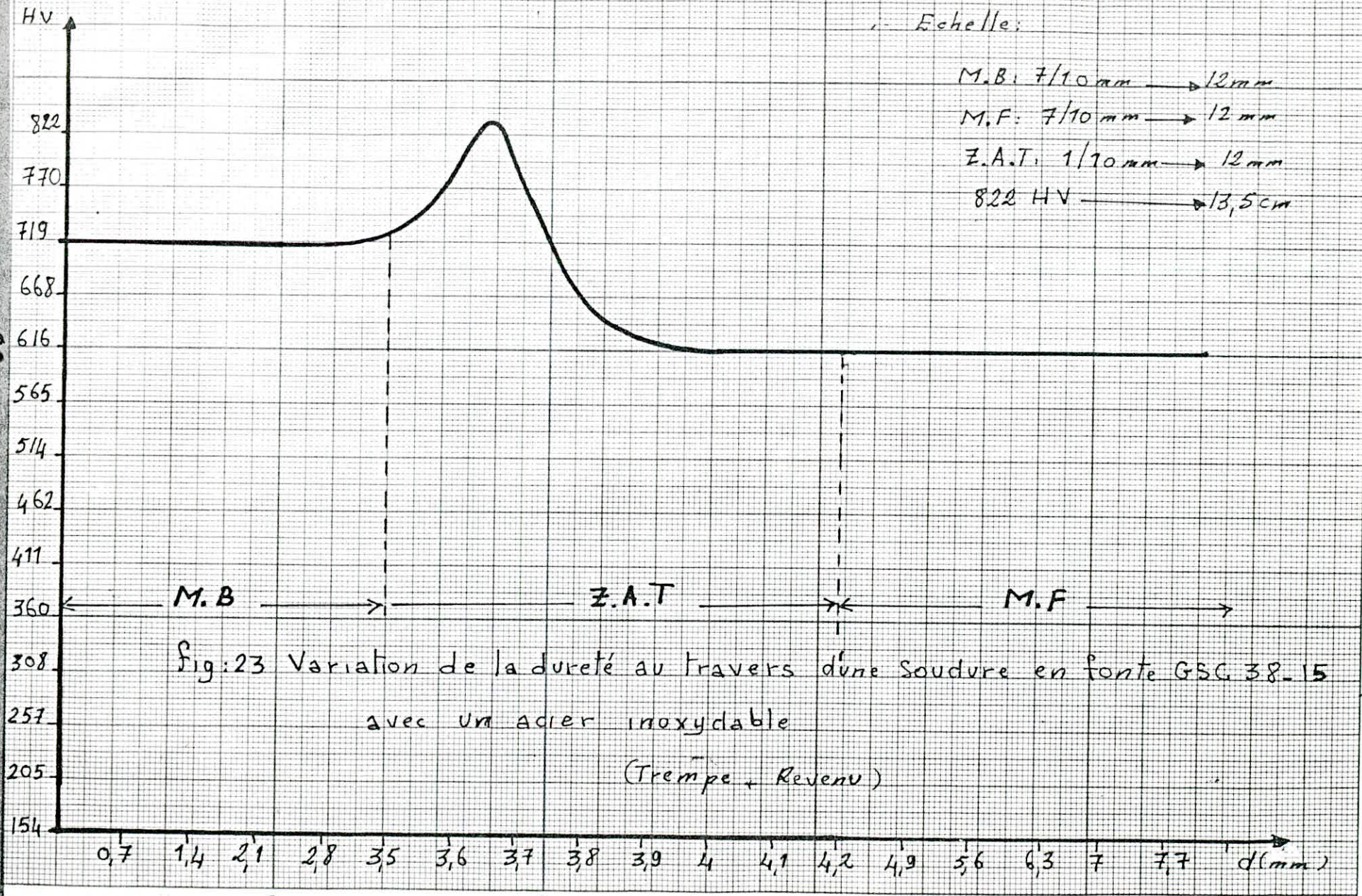


Fig:23 Variation de la dureté au travers d'une soudure en fonte GSG. 38-15 avec un acier inoxydable (Trempe + Revenu)

(Fig 23)

LARGEURS DES ZONES AFFECTEES THERMIQUEMENT en ( mm ).

Mode de traitement thermique / Métal d'apport	Fonte GSC	Acier faiblement allié	Acier inoxydable austénitique.
Brut de coulée	5,6	4,2	0,7
Recuit	0,6	1,1	0,9
Trempe + Revenu	0,3	0,6	0,7

## 5.2. - Commentaires et interprétations des résultats.

### 5.2.1 - Cas du soudage de la fonte GSC 38-15 avec une fonte GSC.

#### 5.2.1.1- Brut de coulée : (Fig.6)

##### \* Métal de base (MB) : (Fig. 6a)

Cette zone présente une structure ferrito-perlitique avec prédominance de la ferrite et du graphite sphéroïdal.

##### \* Zône affectée thermiquement (Z.A.T.) : (Fig. 6b)

La température atteinte dans la Z.A.T. est aussi grande à cause de l'apport calorifique élevé, de ce fait le graphite se dissout dans l'austénite, et après refroidissement, la quantité de la perlite augmente.

A la surface de liaison entre la Z.A.T. et le métal fondu (zône de liaison) se cristallise la structure dite de "Widmanstâetten" cémentitique sous forme des aiguilles.

##### \* Métal fondu (MF) : (Fig 6d)

A cause de la grande vitesse de refroidissement de cette zone, on a présence d'une structure dendritique orientée, et la cristallisation du graphite sous forme de lamelles est dûe essentiellement à la grande température de soudage à laquelle le <sup>magnésium (Mg)</sup> ~~manganèse (Mn)~~ se brûle, de ce fait le graphite ne s'est pas cristallisé en sphéroïdes.

#### 5.2.1.2.- Recuit : (Fig.8)

##### \* Métal de base (MB) : (Fig. 8a)

Après ce traitement, la matrice obtenue est entièrement ferritique avec du graphite sphéroïdal ayant une forme plus compacte.

##### \* Zône affectée thermiquement (Z.A.T.) : (Fig.8b)

Le recuit complet a permis la transformation de la perlite en ferrite, et fait disparaître complètement de "Widmanstâetten" en raison de la décomposition de la cémentite.

##### \* Métal fondu (MF) : (Fig. 8e)

Cette zone est le siège du développement du graphite déchiqueté d'une part et de la disparition de la structure dendritique d'autre part.

5.2.1.3. - Trempe et revue à basse température : (Fig.10)

\* Métal de base (MB) : (Fig. 10a)

Après un tel traitement on obtient une structure martensitique et une faible quantité d'austenite résiduelle, et du graphite sphéroïdal.

\* Zône affectée thermiquement (Z.A.T.) : (Fig. 10b)

La zone affectée présente une structure martensitique avec formation des halos de ferrite autour du graphite, cela est dû essentiellement à la <sup>d</sup>carburation.

\* Métal fondu (MF) : (Fig. 10d)

Dans la zone fondue la structure observée est composée de la martensite et de l'austenite résiduelle.

REMARQUE :

Dans les cas qui suivent on ne s'intéresse qu'aux zones affectées et aux métaux fondus ayant subi différents traitements, car le métal de base est toujours le même (fonte GSC 38-15)

5.2.2. - Cas du soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier faiblement allié.

5.2.2.1. - Brut de coulée ; (Fig.12)

\* Zône affectée thermiquement (Z.A.T.) (Fig.12b)

Cette zone comme étant située en contact avec le métal fondu, elle atteint ainsi durant le soudage une température suffisamment grande pour provoquer la dissolution du graphite, et lors du refroidissement, on obtient une structure perlitique avec une faible quantité de la ferrite.

La zone de liaison entre la Z.A.T. et le MF est constituée d'une structure dite de " Widmanstâetten " ( Fig.12c)

\* Métal fondu (MF) : (Fig. 12d)

Après la cristallisation le métal fondu est composée d'une structure ferrito-perlitique, et une faible quantité de graphite sphéroïdal.

5.2.2.2. - Recuit : (Fig. 14)

\* Zône affectée thermiquement (Z.A.T.) : (Fig. 14c)

Dans ce cas le recuit a permis l'obtention d'une structure ferritique, et du graphite ayant une forme plus compacte.

\* Métal fondu : (Fig. 14e)

Cette zone est caractérisée par une matrice ferrito-perlitique telle que la cristallisation de la ferrite s'est déroulée au niveau des joints des grains à cause du faible pourcentage en carbone ( $< 0,8\%$ ).

5.2.2.3.- Trempe et revenu à basse température : (Fig. 16)

\* Zône affectée : (Fig. 16c)

La Z.A.T. après un tel traitement thermique a une structure martensitique avec des globules fines de graphite.

\* Métal fondu : (Fig. 16d)

Après cristallisation, cette zone est constituée d'une matrice martensitique de structure orientée (orientation dans le sens de l'évacuation de la chaleur) et une faible quantité d'austénite résiduelle, de plus on a une formation de la ferrite, c'est pourquoi la martensite obtenue n'est pas sursaturée en carbone.

5.2.3. - Cas du soudage de la fonte GSC 38-15 avec un acier INOX.

5.2.3.1.- Brut de coulée : (Fig. 18)

\* Zône affectée thermiquement : (Fig 18c)

C'est une structure à matrice perlitique contenant du graphite sphéroïdal, et la présence du chrome provoque la cristallisation de la fonte blanche (structure lédéburitique) dans la zone de liaison.

\* Métal fondu : (Fig. 18c)

Une structure dendritique est obtenue lors du refroidissement du métal fondu (18% de Cr et 8% de Ni) avec la cristallisation d'une faible quantité de la perlite aux joints des grains provenant de la diffusion du carbone du MB vers le MF.

5.2.3.2. - Recuit (Fig.20)

\* Zône affectée thermiquement : (Fig.20c)

Après le recuit on constate un élargissement de la zone affectée, celui-ci est dû à la diffusion, du chrome du MF vers le MB et du carbone dans le sens inverse.

Grâce à la stabilité de la cémentite par le Chrome, la structure obtenue est entièrement ferritique.

Par contre le recuit n'a pas d'effet dans la zone de liaison



\* Métal fondu : (Fig. 20e)

Cette zone a une structure à grains fins; composée d'austénite, et d'une faible quantité de perlite se cristallisant aux joints des grains.

5.2.3.3. Trempe + Revenu:  
Zône affectée : (Fig. 22b)

Elle présente une structure martensitique et du graphite sphéroïdal.

\* Métal fondu : (Fig 22d)

La zone du métal fondu est le siège de la formation des plages blanches d'austénite résiduelle et de martensite.

### 5.3. Commentaires et interprétations des caractéristiques mécaniques.

L'établissement des courbes de filiation de microduretés permet de relever les caractéristiques mécaniques (duretés Vickers) et les caractéristiques géométriques telles que les largeurs des zones affectées thermiquement.

En effet les courbes obtenues présentent un maximum situé au niveau de la zone affectée par la chaleur (Z.A.T.), ce maximum dépend essentiellement de la nature du métal déposé et du traitement thermique effectué.

Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la(Z.A.T.), les valeurs des microduretés décroissent jusqu'à atteindre celles de base.

Il apparait clairement que le phénomène de variation de duretés est en liaison avec l'évolution du mode du traitement thermique autrement dit de la variation des structures.

Le tableau N°2 regroupe les résultats des essais mécaniques effectués, (Essai de traction, résilience)

Les essais de traction conduisent tous à des ruptures parfois prématurées et cela est dû à l'effet du cycle thermique effectué pour le soudage qui peut être le siège d'apparition des fissures au niveau de la zone affectée thermiquement.

Il est ainsi confirmé que les valeurs des allongements sont toutes nulles sauf pour le cycle avec le recuit qui, en abaissant la dureté procure un allongement relativement faible ainsi, dans le cas du soudage de la fonte GS avec un métal d'apport analogue, le recuit conduit à un allongement de 1,25%, de 2,5% dans le cas d'un acier faiblement allié et de 0,6% dans le cas d'un acier inoxydable.

Une amélioration de la résistance aux chocs (résilience) est distinguée après un recuit pour les trois métaux d'apport, l'énergie absorbée tend à croître à mesure que l'on s'écarte du côté endroit de la soudure, vers le centre et le côté envers.

\*\*\*\*\*

-o- C O N C L U S I O N -o-  
+++++

La préoccupation primordiale des métallurgistes a été toujours l'amélioration, sans cesse, des performances et qualité des métaux et alliages.

Les propriétés mécaniques font partie, en première urgence des caractéristiques métalliques donnant des performances <sup>de ces</sup> et cette qualité.

Notre étude qui nous a surtout été l'occasion de connaître l'évolution des différents modes de traitements thermiques sur les métaux d'apport utilisés dans le soudage de la GSC 38 - 15.

A cet égard, on voit le rôle de l'enrobage paraître clairement dans le procédé de soudage vu son rôle protecteur des cordons de soudure contre l'oxydation, et le contact du métal déposé avec le milieu extérieur.

Vu les résultats expérimentaux obtenus, il s'avère qu'un traitement hermétique après soudage assure des caractéristiques mécaniques très suffisantes.

Ainsi le concassage des grains, la réduction de la fragilité permettent d'améliorer sensiblement les caractéristiques de la plasticité.

Ces résultats nous ont donné la possibilité de mettre en évidence le choix de l'acier faiblement allié qui a assuré à l'assemblage soudé l'obtention de bonnes caractéristiques mécaniques (charge et résistance à la rupture) et de même les caractéristiques de ductibilité (allongement et résilience).

Donc, le choix de l'acier faiblement allié <sup>recuit</sup> qui est moins couteux que ~~cette de~~ la fonte, nous permet d'automatiser le procédé de soudage avec un prix de revient convenable.

Enfin il est souhaitable que notre étude sera complétée par d'autres afin de mettre en évidence le phénomène de fissuration qui, à nos jours reste le problème qui a une grande influence dans les assemblages soudés. Il en est de même pour une étude sur l'influence des différents paramètres de soudage.

B I B L I O G R A P H I E  
\*\*\*\*\*

- 1) LAKHTINE - Métallographie et traitements thermiques.
- 2) C.CHAUSSIN - G.HILLY - Métallurgie tome I, alliages métalliques.
- 3) André ROOS - Précis de métallurgie appliquée.
- 4) J.DEJIEUX - Cours techniques de soudage.
- 5) R.LEGOUIC - Précis de soudage, brasage et techniques connexes Ed<sup>t</sup>  
EYROLLES.
- 6) Robert DIETRICH - La Construction Mécanique tome II (méthodes  
constructions, normes) Ed<sup>t</sup> de l'usine.
- 7) R.VARISELLAZ - Soudage, éléments de conception et de réalisation
- 8) MENDEL - Pour le soudeur à l'arc.
- 9) R.MESLIER - La soudure autogène au chalumeau et à l'arc.
- 10) HOULDEROFL - Les procédés de soudage.
- 11) D.SEFERIAN - Métallurgie de la soudure.
- 12) POLOUKHINE,P - Technologie de la soudure.
- 13) REVUE - Soudage et Techniques connexes.(Juillet -Août 1987)
- 14) REVUE - La fonderie Belge 1974.
- 15) REVUE de la soudure 1968.

\*\*\*\*\*

