

Remerciement

M. A. Boumaza a très bien dirigé ce travail avec enthousiasme et passion. Le présent mémoire de magistère est le fruit de son grand soutien, les discussions continus et le développement des connaissances au niveau du centre universitaire d'Oum el Bouaghi.

La majorité des travaux et analyses de ce mémoire ont été réalisés au sein du CPG (Complexe des pelles et grues). Pour cela, je tiens à remercier sincèrement les divers organismes du CPG, en particulier *M. D. Deghdag* et à tout son équipe de laboratoire. Ainsi que *M. T. Belalou*.

Je suis très heureux de témoigner ma profonde gratitude à *M. Ben Ali Cherif.N* d'avoir bien voulu me faire l'honneur de présider le jury, ainsi que *Zouchoune B.* et *Bouhenguel M.* d'être intéressés à ce travail et d'avoir accepté d'être membre du jury.

Je tiens aussi à remercier le chef du laboratoire d'électronique et le responsable du microscope électronique à balayage *M. A. Mellal* de sa grande aide technique.

Je suis aussi particulièrement reconnaissant à monsieur *Z. Boumerzoug* ; directeur de l'institut de mécanique (Université de Biskra), à monsieur *Benmalek M.* ; ingénieur au CPG, à monsieur *Dr Fahim* ; responsable du labo de physique l'Université de Constantine et également à Mme *H. Benmachiche* (directrice du laboratoire de chimie de Biskra) de leurs grandes disponibilités scientifiques et surtout dans le cadre de soutien matériel.

الملخص

إن الدراسة بواسطة الأشعة السينية و الميكر الإلكتروني الماسح و كذلك الضوئي المدعمة بالتحليل الكيميائي-الكاربوميترية واسكتروميترية بالإضافة إلى التحليل بواسطة صلابة فيكس تعتبر الحجر الأساس في البحث في مجال المعجنة وكيمياء الوصل الملحم.

هذه الطرق المختلفة من الملاحظات والتحليل تسمح لنا بالتعرف على العناصر الكيميائية المتواجدة في الوصل كما يمكننا التعرف على مختلف الأطوار المتواجدة والتي تدخل في تركيب مختلف المناطق للجملة المتكونة أساسا من معدن الأساس ثم المنطقة المطابة بالحرارة بالإضافة إلى معدن السند. نضيه إلى كل ذلك الشواذب المتواجدة في الجملة.

من خلال دراستنا هذه تطرقنا إلى ما يلي

- التأكد من نسبة الكربون والمنغنيز و السيليسيوم.
- التعرف على مختلف الأطوار المكونة للوصل الملحم.
- اكتشاف آثار الغازات المتواجدة أثناء التلحم.
- دراسة مدى مقاومة الجملة الملحمة للتشويه.

يبدو جليا بأن تقنية اللحام تخضع إلى عوامل كثيرة ومعقدة. أهمها تأثير الجملة حراريا- كيميائيا وميكانيكيا. كما وأن الحصول على وصل أكثر مقاومة يتطلب الأخذ بعين الاعتبار كل هذه البارامترات والتي هي في بعض الأحيان متناقضة مما يجعل الحصول على وصل ملحم عالي المقاومة شيئا صعبا.

العلامات المتواجدة

الغولاط- اللحام- فيرايت- سيمنتايت- بيرلايت- بينيت- مسامات- شواذب

Résumé

Les analyses par rayons X et les examens métallographiques (électronique et optique) associés aux analyses chimiques ainsi que les mesures de micro dureté sont la base de l'étude métallurgique-chimique des soudures. Ces diverses techniques d'investigation mettent en évidence la grandeur et la forme des grains, les divers éléments de l'alliage, la structure ou les structures diverses des zones constitutives du joint soudé ainsi que les défauts inclusionnaires et micro fissures existants dans cette jonction. Notre étude s'est consacrée à :

- L'analyse des éléments qui jouent un rôle déterminant dans la jonction ,*
- la reconnaissance des différentes phases existantes dans le joint et ce en partant de la zone fondue jusqu'au métal de base,*
- La vulgarisation des effets des gaz par présence de soufflures vermiculaires importants,*
- La caractérisation du joint par sa résistance à la déformation .*

En fait le soudage se traduit par un traitement thermique-chimique et mécanique qui modifie localement les propriétés de l'acier. Il en résulte la nécessité de maîtriser tout les paramètres régissant cette technique afin d'optimiser le joint et de réaliser une structure capable de résister aux sollicitations de service qu'elles soient mécaniques ou autre (agressivité chimique et fluctuations thermiques).

Mots-clés :

Acier, soudure, ferrite, cémentite, bainite, perlite, soufflures, précipités .

Abstract

Analyses by x-rays and metallographic tests (electronics and optics) associated with the chemical analyses, as well as measurements of micro-hardness are the base of the metallurgical-chemical study of the weldings.

These various techniques of investigation underline the size and the shape of the grains, the various elements of alloy, the structure or the various structures of the zones constitutive of the welded, as well as the inclusion defects and micro joint cracks existing in this junction.

Our study was devoted to:

- Analysis of the elements which play a part determining in the junction,
- Recognition of the various existing phases in the joint and this on the basis of the zone melted to the base metal,
- The popularization of the effects of gases by presence of vermicular blisters important,
- The characterization of the joint by its resistance to the deformation.

In fact, welding results in a thermics-chemical treatment and mechanics which modifies the properties of steel locally.

It results the need from it for controlling all the parameters governing this technique in order to optimize the joint and for carrying out a structure able to resist the requests of service which they are mechanical or different (chemical aggressiveness and thermal fluctuations).

Sommaire

N°	Titres	Page
	Introduction - CHIMIE DU SOUDAGE	1
	CHAPITRE-I-LE SOUDAGE	3
1-1-	Définition	3
1-2-	Historique	3
1-3-	Procédés de soudage	5
1-3-1-	Le soudage sous protection gazeuse-MAG	6
1-3-2-	Eléments de protection	6
1-3-3-	Les avantages du procédé	7
1-4-	Technique de soudure	7
1-4-1-	Parties constitutives d'un joint soudé	7
1-4-2-	Types fondamentaux de joints soudés	9
1-5-	Soudabilité des métaux et alliages	10
1-5-1-	Définition	10
	CHAPITRE-II-LE FER ET LES ACIERS	12
II-1-	Le fer	12
II-1-1-	Caractéristiques du fer	12
II-1-2-	Propriétés chimiques du fer	12
II-1-3-	Combinaisons chimiques	13
II-1-4-	Le carbone et durcissement du fer	13
II-2-	Evolution historique	14
II-2-1-	Normalisation	14
II-2-2-	Les aciers	15
II-3-	Classification des aciers au carbone	15
II-3-1-	Aciers d'usage général	16
II-3-2-	Aciers pour construction mécaniques	16
II-3-3-	Aciers pour constructions métalliques	16
II-4-	Aciers alliés	16
II-4-1-	Définition	16
II-4-2-	Désignation des aciers alliés	17
II-4-2-1-	Aciers faiblement alliés	17
II-4-2-2-	Aciers fortement alliés	17
II-5-	Rôle des éléments d'alliage	18
II-5-1-	Eléments d'alliage	18
II-6-	Propriétés des aciers	22
II-7-	Structures cristallines des aciers	22
II-7-1-	Le fer alpha	22
II-7-2-	Le fer gamma	22
II-7-3-	Le fer delta	23

II-8-	Aspects micrographiques des constituants de l'acier	23
II-8-1-	Constituants d'équilibre	23
II-8-2-	Constituants de transition	25
II-8-3-	Constituants hors d'équilibre	25
II-9-	Le diagramme d'équilibre	28
	CHAPITRE-III-ETUDE EXPERIMENTALE	
III-1-	La carbométrie	48
III-2-	La spectrométrie	54
III-3-	La micro dureté	65
III-4-	Etude métallographique	76
III-5-	Effets des gaz	97
III-6-	Etude par rayons X	100
	CHAPITRE - IV- Discussion des résultats	109
	CONCLUSIONS	115
	Bibliographies	
	ANNEXES	

Introduction - Chimie du soudage

C'est à juste titre que, aux différences près due aux brièveté de l'opération, le soudage, tout particulièrement le soudage par fusion, a pu être comparé à une méthode d'élaboration, en raison de l'évolution qui se produit dans la composition chimique et les transformations structurales qui se créent tant au niveau du métal de base que sur le métal fondu du cordon de soudure. Phénomènes liés à la présence de plusieurs facteurs actifs :

- Eléments chimiques favorisant la fissuration à chaud ou à froid (problème de volatilisation, formation de phases très dures, phases liquides aux joints de grains,);

- Gaz : tel l'Hydrogène, l'oxygène et l'azote...(formation de soufflures.....);

Ces agents et plus particulièrement ceux qui sont les plus nocifs deviennent encore plus vulnérables lorsqu'ils sont :

- Activés thermiquement (C'est le cas du soudage ou les températures dépassent les températures de fusion - T_{max} de l'ordre de 1600 °C);

- En présence des phases fragiles rajoutées à un état de contraintes défavorable.

En faite les deux parties principales constitutives de la structure soudée vont être fragilisées chacune suivant le traitement qu'elle a subie :

Concernant le métal fondu : Durant le séjour à l'état liquide, des réactions chimiques sont susceptibles de se produire entre éléments présents, qu'ils proviennent du métal d'apport ou du métal de base et même du milieu gazeux liés au soudage. De telles réactions se traduisent par une évolution des propriétés, mécaniques ou autres et éventuellement par une altération de la compacité s'il y a formation de composés insolubles ou dégagement de gaz voir même formation de phases fragiles.

Concernant le métal de base : Le métal de base de par son contact direct avec le métal fondu lors du soudage peut atteindre des températures se rapprochant de 1200°C, ce qui entraînerai à des structures grossières et par conséquent dégénérées.

L'ingénieur soudeur se trouve ainsi confronté à deux problèmes essentiels :

- La recherche d'une protection du bain de fusion contre l'atmosphère environnante,
- La non altération du métal de base par un chauffage excessif (surchauffe) ce qui entraînerai la dégradation de l'ensemble soudé.

Notre étude du joint soudé va donc se focaliser sur le rôle

- Des principaux éléments entrant dans la composition chimique du joint soudé (Fer, Carbone, Manganèse,),

- Des principales phases constituants ce joint (Ferrite, Perlite, Bainite),

- Et enfin sa caractérisation par sa dureté et sa résistance à la rupture le long de ses différentes zones (Z.F. – Z.A.C. – M.B.).

Ce travail présente le long de deux parties essentielles, théorique et expérimentale, une analyse des phases constitutives d'un joint soudé en utilisant différents procédés et techniques.

Les deux premiers chapitres résument la partie théorique du sujet. Ainsi le chapitre premier est consacré à la définition du soudage et de ses procédés et les techniques industrielles les plus utilisées.

Dans le deuxième chapitre, on trouve une étude quasi-détaillée concernant le Fer et les aciers et aussi le rôle des éléments d'alliages sur les propriétés mécaniques.

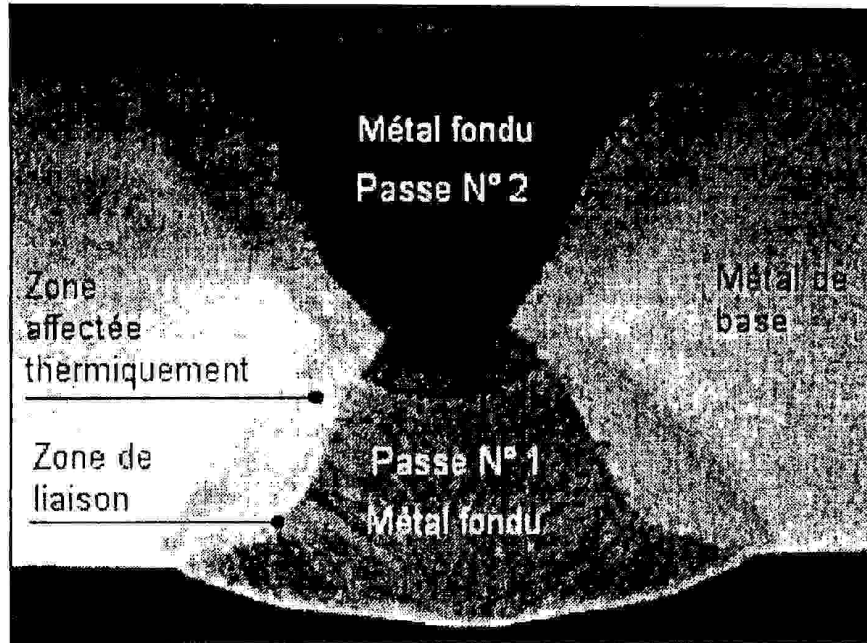
La partie expérimentale présentée dans le troisième chapitre donne les différentes méthodes d'analyses utilisées et leurs caractérisations ainsi que les résultats obtenus.

Dans le chapitre IV nous avons présenté une discussion des résultats afin de clarifier les différents phénomènes régissant la partie métallurgique et chimique du sujet.

Une fois les résultats présentés et commentés, nous avons achevé notre travail par une conclusion générale puis les références bibliographiques et l'annexe.

CHAPITRE I

LE SOUDAGE



CHAPITRE I- LE SOUDAGE

I -1 : Définitions

Le soudage : C'est une opération qui consiste à assembler deux ou plusieurs tôles rigidement de manière à assurer une certaine continuité entre elles ou parties d'un grand ensemble.

Cet assemblage se fait de diverses manières et façons, on utilise parfois la pression, parfois la chaleur ou les deux combinés en même temps et d'autre fois d'autres sources d'énergie.

On estime qu'actuellement le soudage est utilisé dans presque tous les domaines, dans la fabrication et les assemblages métalliques et ceci de la microélectronique jusqu'à la fabrication de corps de presses hydrauliques. Aujourd'hui on soude presque la totalité des métaux existants et ceci de 0.01 mm à 100 mm d'épaisseur, en utilisant plusieurs procédés.[1]

La soudabilité : On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondantes à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joint soudé qui par leurs caractéristiques locales et les conséquences de leurs présences, satisfont aux propriétés requises est choisies comme base de jugement.

I-2 : Historique

Le soudage est un procédé d'assemblage qui permet de réunir deux ou plusieurs métaux. Ce procédé assure la continuité de la matière, contrairement à d'autres techniques d'assemblage des métaux, qu'elles soient mécaniques, comme le rivetage et le boulonnage, ou chimiques telles que le collage n'assurent pas la continuité de la matière.

Comme toutes les techniques que connaît l'homme actuellement, le soudage a connu à travers le temps beaucoup de rebondissements et d'améliorations dont le but d'atteindre cet ère à assembler les métaux de manière rigide est continue. La plus ancienne des méthodes connues, consistait à marteler ou forger les pièces chauffées l'une par rapport aux autres sur une enclume.

Au début du XX^e siècle, un autre procédé qui s'apparente au soudage se développa ; il s'agit du rechargement des pièces moulées. Une pièce moulée est fabriquée en remplissant un moule de métal fondu ; puis en laissant un moule autour de la partie usée ou brisée. Du fer en fusion était ensuite versé dans le moule, jusqu'à ce que la surface de la pièce s'amollisse. Le moule était reformé et enlevé après le refroidissement. En fait, il s'agissait plus d'un moulage que d'un soudage.

Cette manière d'assurer une jonction entre plusieurs parties d'un ensemble a connu à travers le temps des améliorations et des modifications considérables.

Actuellement le développement des procédés de soudage est dirigé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédure, métallurgie, et équipement), vers l'apparition des robots industriels et la programmation, vers l'application de nouvelles sources d'énergies. [2,3,4]

Voici quelques dates qui ont marqué l'histoire du soudage moderne :

• 1900	Le premier chalumeau oxyacétylénique fait son apparition en France par Charles Picort.
• Entre 1900 et 1907	L'électrode fusible nue est née en URSS par Slarianov.
• 1907	Le brevet pour l'électrode enrobée fut donné au suédois Kjellberg.
• 1908	La première décharge électrique entre deux électrodes en graphite est réussie.
• 1924	Le premier brevet du soudage TIG est donné aux américains Divers et Hobard.
• 1925	L'apparition du fil fourré au U.S.A.
• 1935	L'apparition du soudage tous flux pondéraux aux U.S.A.
• 1948	L'apparition du procédé MIG aux U.S.A.
• 1955	Le premier brevet du soudage plasma fut donné aux U.S.A.
• 1960	Apparition du procédé MAG pour des raisons économiques.
• 1950 et 1960	Apparitions du soudage par explosion et le soudage par bombardement électronique - France.
• 1965	Apparition du soudage avec le laser

I-3 : PROCÉDES DE SOUDAGE

A l'heure actuelle, des dizaines de procédés existent, leur classement dans la majeure partie du temps est basé sur la source d'énergie utilisée, le sous classement se fait en se basant sur l'énergie directement utilisée et puis sur la modalité de leurs utilisations. Les principaux procédés de soudage sont :

Soudage à l'arc électrique

Ce soudage consiste à utiliser les méthodes suivantes

- a - Electrode enrobée ;
- b - Electrode réfractaire (non fusible) TIG ;
- c - Fil électrode sous protection gazeuse MIG ou MAG ;
- d - Fil électrode sous flux poudreux.

Soudage par résistance électrique

Cette méthode se présente sous plusieurs aspects :

- a - Par point ;
- b - Par étincelage ;
- c - A la molette ;
- d - Par brasage.

Soudage par Focalisation

La localisation de la jonction de deux métaux est faite par :

- a - Faisceau d'électrons
- b - Laser
- c - Infra rouge

comparativement aux procédés de soudage nommés ci-dessus, il en existe d'autres comme par exemple :

- Le soudage au plasma,
- Le soudage mécanique ; dans ce dernier l'exploitation est faite par différentes méthodes :
 - * Par Explosion ;
 - ** Par Ultrason ;
 - *** Par Friction ;
 - **** A Froid.

Le soudage par fusion est l'ensemble des procédés qui consistent à assembler des pièces de métal par fusion des parties en contact, le soudage sans fusion est l'ensemble des procédés qui consistent à assembler des pièces de métal sans

fusion des parties en contact, le boulonnage, le rivetage et tous les autres modes d'assemblage du même type ne font pas partie du soudage sans fusion.[1,2]

I.3.1 : Le soudage sous protection gazeuse M.A.G (Fig. 1-1)

La chaleur est fournie par un arc électrique amorcé entre un fil électrode et les pièces à assembler. Le métal d'apport se présente sous forme d'un fil électrode plein ou fourré dont le diamètre varie entre 0,5 ; 2 et 3 mm. .

Le fil fourré est une électrode continue de section tubulaire, dont l'intérieure est remplie de composants analogues a ceux d'un enrobage.

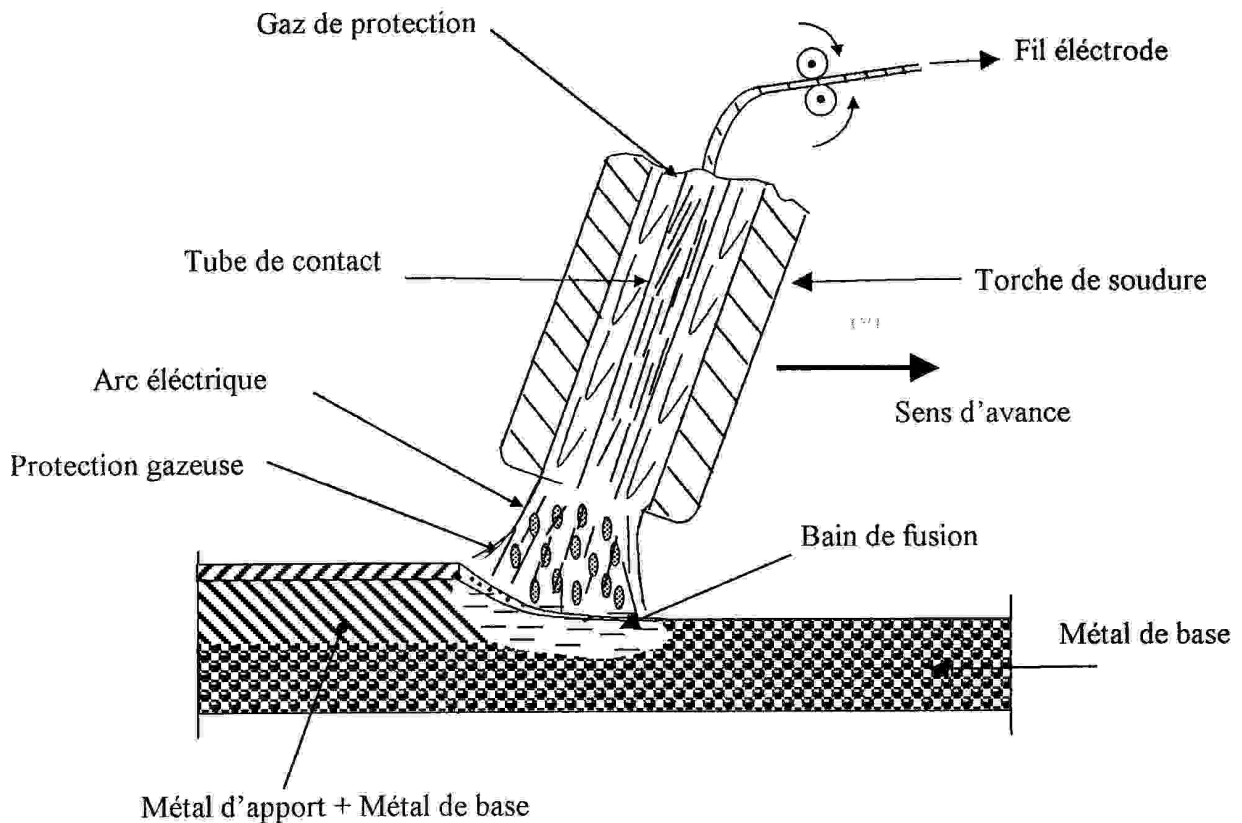


Fig. 1-1 : Schéma du M.A.G [3]

I.3.2 : Eléments de protection

- CO_2 pure;
- $\text{CO}_2 + 5 \text{ à } 20 \% \text{ d'O}_2$;
- $\text{Ar} + 15 \text{ à } 30 \% \text{ de CO}_2$;
- A haute température au voisinage de l'arc : $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \dots \text{O}_2$;
(réaction endothermique : consomme la chaleur).
- $\text{C} + \text{FeO} \rightarrow \text{CO}$, l'acier est décarburé ;

Le volume de CO formé par ces réactions représente 2 à 3 % du volume de CO₂ utilisé le CO en se dégageant du bain de fusion maintient celui-ci en effervescence : risque de soufflure au refroidissement.

I.3.3 : Les avantages du procédé

Le soudage **M.A.G.** se distingue des autres procédés en divers points à savoir :

- *Son ample domaine de réglage allant de l'arc court (régime sous critique) à l'arc étincelant (régime sur critique) pour un diamètre du fil bien déterminé.*
- *La possibilité de travailler en toutes positions de soudage, en choisissant convenablement les valeurs du courant.*

I-4 : Technique de Soudure

La soudure est un assemblage dans lequel les métaux des pièces assemblées participent directement à la formation du joint (appelé joint soudé), soit en atteignant ou en dépassant localement leur température de fusion, soit en s'interpénétrant sous l'action d'une pression.[3]

I.4.1 : Parties constitutives d'un joint soudé (fig. 1-2)

- **Métal de base (M.B)** : métal des pièces à assembler, ces pièces peuvent être en métaux semblables ou dissemblables.

- **Métal d'apport** : non nécessaire dans tous les cas, 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** : dans les soudures par fusion, le bain est formé du métal de base seul (lorsque la soudure est effectuée sans métal d'apport) ou du mélange de métal de base et de métal d'apport à l'état liquide. 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** : (ou zone affectée par la chaleur): la (ZAT) est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue mais dont les propriétés mécaniques ou la micro structure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur de soudage. Dans cette zone on distingue, dans le cas Soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation d'une zone transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température à été suffisante pour entraîner une transformation dite allotropique de la structure et, dans une modification des propriétés physique du métal, sans qu'il y ait un changement de sa composition chimique, dans l'autre partie de la zone thermiquement affectée, il n'y a pas en transformation allotropique, mais seulement des modifications, comme par exemple, de la grosseur et / ou la forme des grains du métal.

- **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 à l'état solide au cours de l'opération de soudage.

- **Pénétration** : profondeur sur la quelle s'est étendue la fusion dans le métal de base.

- **Passe** : trajet parcouru le long du joint pour fondre les bords du métal de base et, s'il y a lieu, Déposer Le métal d'apport, le résultat d'une passe est un cordon de soudure. Dans la pratique, on emploie souvent le mot « passe » pour désigner un cordon ; c'est la raison pour la quelle on dit d'une soudure comportant plusieurs cordons qu'il s'agit d'une soudure multi passe, la première passe déposée prend le nom de passe de fond(racine), les passes suivantes étant des passes de remplissage et enfin les dernières soudures sont appelés passes de finition.

- **Endroit d'une soudure** : coté par lequel la majeure partie de la soudure à été effectuée ; l'envers est le coté opposé ; il comporte la racine de la soudure dans le cas des soudures sur bords droits et sur chanfrein simple.

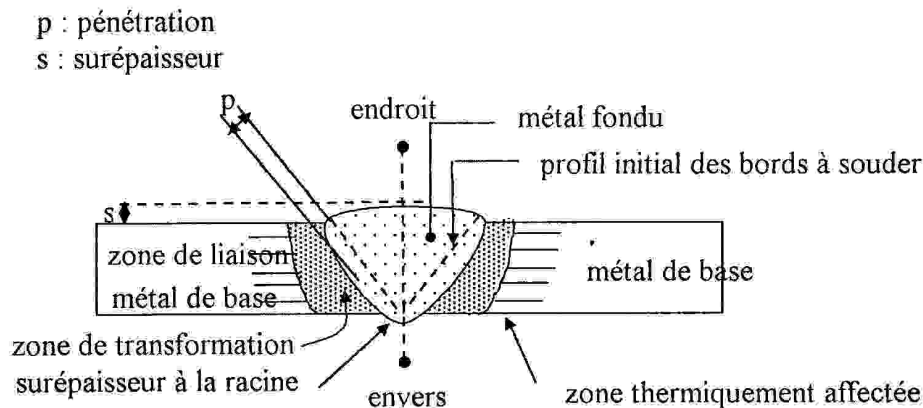


Fig. 1-2 : Soudure (bout à bout sur chanfrein en V) [3]

- **Soudure avec reprise à l'envers** : une soudure est dite avec reprise à l'envers lorsqu'on y dépose un cordon par une passe à l'envers. L'envers est la coté opposé de l'endroit ; il comporte la racine de la soudure dans le cas des soudures sur chanfrein simple.
- **Raccordement** : limite extérieure entre le métal fondu et le métal de base, soit à l'endroit, soit à l'envers de la soudure.

1.4.2 : Types fondamentaux des joints soudés (fig. 1-3) :

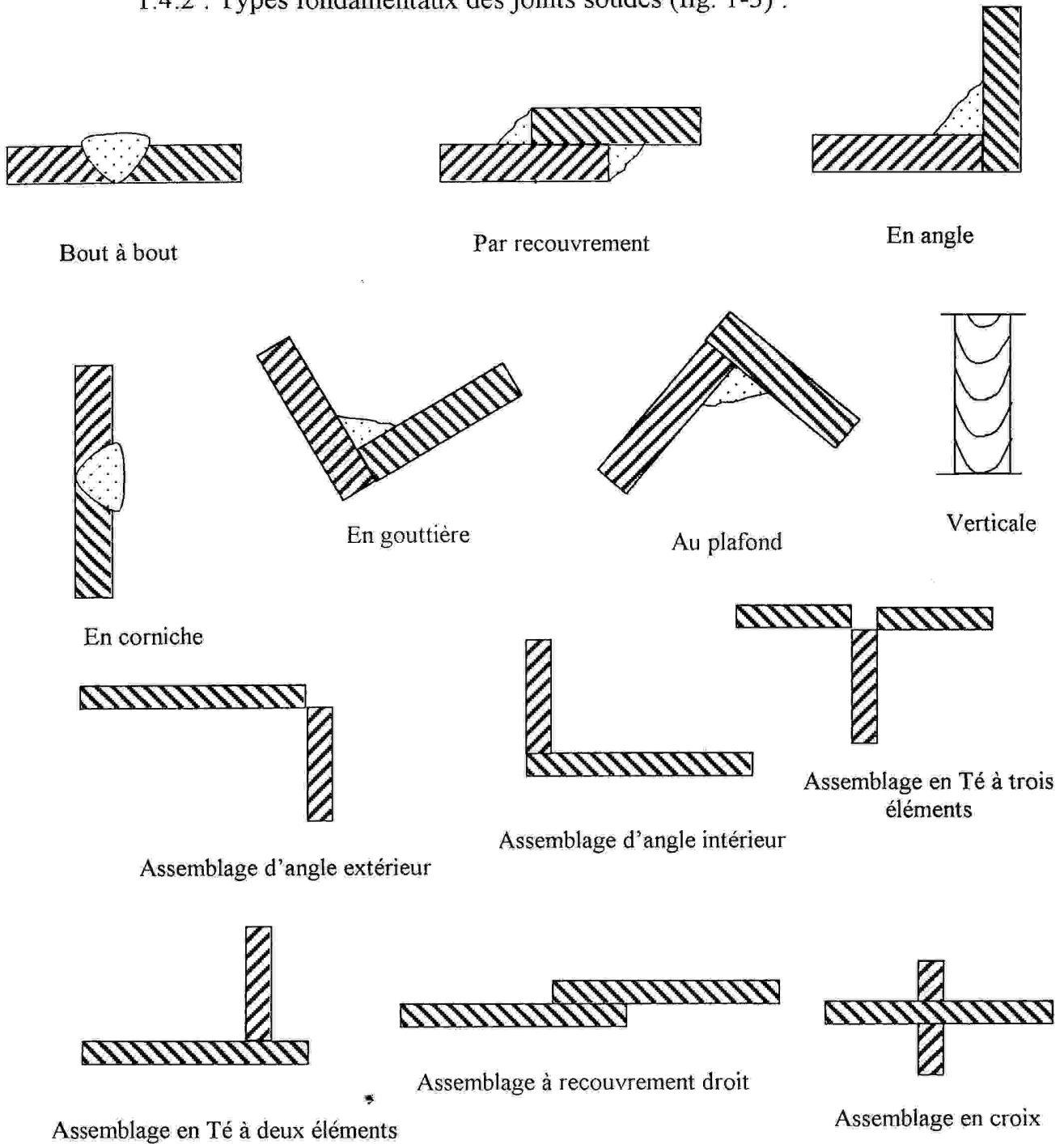


Fig. 1-3 : types fondamentaux des joints soudés [3]

I-5 : Soudabilité des métaux et alliages

I.5.1.Définition

Depuis l'apparition des premiers procédés, le terme de soudabilité a été employé en de multiples occasions, pour qualifier le comportement des matériaux pendant ou après le soudage, mais souvent en des sens différents. Pour classer les divers aspects de la soudabilité et montrer à quel point il s'agit d'un complexe de propriétés. On peut distinguer trois (3) catégories de problèmes différents, mais non indépendantes.[5]

- Soudabilité opératoire :

Une première catégorie de problème se présente, au moment de l'exécution de la soudure, lorsque le comportement du métal, ou Alliage à souder fait obstacle à l'obtention de la continuité métallique, dans le sens où le problème est dans l'exécution même de la soudure, le problème évoqué concerne la soudabilité "opératoire"

- Soudabilité métallurgique ou locale :

Si dans une soudure réalisée, l'une des zones qui la constituent (zone fondue de liaison ou affectée thermiquement) se trouve altérée du fait de l'opération elle-même, au point de remettre en question le comportement de l'assemblage dans les conditions de services prévus, on parle alors de soudabilité "locale".

- Soudabilité globale :

Enfin, si la continuité métallique entre les parties à assembler pose le problème du comportement d'ensemble de la construction soudée, il s'agit de la soudabilité "globale".

Ce problème résulte généralement des méfaits dus aux contraintes résiduelles ainsi qu'aux effets locaux déjà mentionnés ; ces deux résultants de l'opération de soudage.

I.5.2 : carbone équivalent métallurgique CEM

Dans le cas des aciers un critère de soudabilité est donné par le "facteur" carbone fixé par l'institut international de soudure.[3] et qui est donné par :

$$C_{\text{eq}} \% = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu\%}{15}$$

C_{eq} : le carbone équivalent métallurgique

- Si $CE \leq 0.40$ on peut souder sans précaution.
- Si $0.41 \leq CE \leq 0.60$ il faut donc effectuer un préchauffage avec la température entre 200 à 350 C°
- Si $CE \geq 0.6$ notre acier est difficile à souder.
- Si $CE > 0.7$ l'acier est non soudable.

1.5.3 : Le Carbone équivalent compensé C.E.C

La **B.R.W.A** (*British research welding association*) a superposé à la notion de carbone équivalent métallurgique (**C.E.M**) la notion de carbone équivalent compensé **C.E.C**.

Celui-ci tient compte de la géométrie du joint en particulier de l'épaisseur

$$C.E.C = C.E.M + 0.005 \times e$$

Tel que **e** : épaisseur de la tôle .

CHAPITRE II-LE FER ET LES ACIERS

II-1 : Le fer

II.1.1 : Caractéristiques Du Fer

**Le fer est un métal blanc d'argent
de masse atomique $M=55,85$; nombre atomique 26
de rayon atomique $1,27 \text{ \AA}$**

Sa température de Fusion $T_f = 1536 \text{ }^\circ\text{C}$

Le Fer possède trois formes polymorphes α , γ et δ

Sa densité est de $7,68 \text{ g/cm}^3$

Le Fer le plus pur contient 99,999% de Fe [6]

L' électronégativité du Fer est de 1,83

L'atome de Fer compte 26 électrons : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$

Le fer α existe aux températures inférieures à $910 \text{ }^\circ\text{C}$ et supérieures à $1392 \text{ }^\circ\text{C}$, Le fer α à un Réseau CC à distance réticulaire de $2,8606 \text{ \AA}$.

Le fer γ existe entre $910 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1392 \text{ }^\circ\text{C}$, et a un réseau CFC dont l'équidistance vaut 3.6450 \AA à $910 \text{ }^\circ\text{C}$, et sa densité est supérieure à celle du fer et vaut $8 + 8,1 \text{ g/cm}^3$

[7]

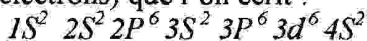
Remarque

Les produits industriels, même les plus performants sont toujours plus ou moins souillé d'éléments étrangers, notamment de carbone.

Leur étude ne peut être séparée de celle des alliages Fer-carbone qui sont principalement les Aciers et les Fontes.

II.1.2 : Propriétés chimiques du Fer

L'atome de Fer compte 26 électrons, répartis sur les niveaux K (2 électrons), L (couche complète de 2+6 électrons), M (couche incomplète avec 2+6+6 éléments) et N (avec 2 électrons) que l'on écrit :



C'est l'une des caractéristiques des métaux de transition de la IV^{ème} période de la classification périodique, d'avoir un niveau 3d incomplet. Il s'ensuit que dans le Fer à l'état solide, les électrons des niveaux 3d et 4S participant à la liaison chimique .

Quoi que la solubilité interstitielle soit généralement limitée à quelques pourcentages, elle peut avoir une grande influence sur des propriétés mécaniques des alliages préparés, les combinaisons du fer avec d'autres métaux MI peuvent générer :

- Des carbures simples ($\text{Fe}_3\text{-C}$ le plus courant) ou complexes, des borures et des nitrides ;
- Des combinaisons intermétalliques lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée.

L'exemple en est fourni par $\text{Fe}_7 \text{Mo}_6$, $\text{Fe}_7 \text{W}_6$, $\text{Fe}_3 \text{Nb}_2$, $\text{Fe}_3 \text{Ti}$...etc.

Certaines de ces combinaisons se rapportent aux phases de laves (Fe_2Nb , Fe_2W , Fe_2Mo , Cr_2Ti ...etc. -

Dans les alliages FeCr et FeV se forment des phases δ dures et fragiles qui correspondent aux combinaisons Fe-Cr et Fe-V. Les alliages Fe-Cr-Mo peuvent former une phase α fragile de composition Fe₃-Cr-Mo (Fe₃₆-Cr₁₂-Mo₁₀) le rôle des phases intermétallique est important surtout pour les Alliages de Fer à faible carbone où elles assurent le durcissement par dispersion. Les phases δ et α fragilisent l'alliage, leur présence est donc indésirable.

En Résumé, vu la capacité prononcée du Fer à dissoudre les autres métaux, cette propriété est exploitée pour son durcissement par l'Addition d'autres éléments.[8]

II-1-3- Combinaisons chimiques

A la différence des solutions solides, les combinaisons chimiques se forment dans la majorité des cas entre les éléments dont les atomes ou les réseaux cristallins ont des structures très différentes. Les combinaisons d'un métal avec un non-métal (carbures Mx Cy, nitrures Mx Ny, Borures Mx By, Hydrides) qui peuvent réaliser une liaison métallique sont souvent nommés combinaisons métalliques.

II-1-4 Le carbone et Durcissement du fer

Le carbone est un élément non métallique de II^{em} période du quatrième groupe dont

- Z = 6 ;
- Densité 2,5 g/cm³ ;
- De masse = 12,011g/mol;
- Sa température de fusion est de 3500°C ;
- L'électronégative du carbone dans l'échelle de Pauling est de x = 2.55 ;
- Son Rayon atomique est de 0,77 Å ;
- C'est un élément polymorphe dans les condition ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite mais peut exister sous la forme d'une variété métastable du diamant.[9]

Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide mais peut aussi former une combinaison chimique ; La cémentite (Fe₃C) et dans les alliages à haut carbone, le **graphite**. Le carbone est le moins cher et le plus efficace élément pour durcir le fer. Les propriétés mécaniques des Alliages obtenus Fe-C dépendent à la fois de la teneur du carbone, de celle des autres éléments d'alliage et du traitement thermique.

A la lecture des valeurs des différentes propriétés physiques du Fer pur et mécaniques du Fer pratiquement pur ; il s'avère que le Fer pratiquement pur n'est pas mécaniquement très performant. Ses caractéristiques de résistance (limite d'élasticité), résistance à la traction mais aussi sa dureté et sa ténacité sont faible, ses caractéristiques de plasticité sont très élevées. Cette remarque est d'ailleurs valable à tous les métaux purs ; le métallurgiste sait qu'il doit les durcir pour leur conférer des propriétés mécaniques intéressantes, pour les constructions qu'il devra simultanément tolérer une baisse concomitante de la ductilité.[10] Parmi les différents modes de durcissement, il y a l'addition d'éléments étrangers en solution solide en fer.

II.2. Evolution historique :

Il ne nous est cependant pas possible de relater dans le faible nombre de pages deux millénaires et demi concernant l'art d'extraire du métal de son minerai, de le transformer en produits semi-finis et de le mettre en forme pour son utilisation.

Nous dresserons donc les faits techniques et scientifiques qui ont jalonné une certaine réalité sidérurgique d'aciers.

La production industrielle d'acier n'a débuté qu'au milieu du XIX^e siècle. Auparavant, la sidérurgie se limitait en Europe uniquement à des productions mineures de fonte et de fer puddlé. Il a fallu attendre l'invention du four au COKE par Darby au XVII^e siècle et les grandes inventions en aciérie du XIX^e siècle [fours Bessemer, Thomas et Martin]. La production mondiale était-elle bien modeste en 1870 limitée à 10 millions de tonnes et cantonnée en Europe surtout en Grande-Bretagne qui était alors le premier producteur d'acier dans le monde avec près de 4 millions de tonnes.

La recherche sur les aciers à usage militaire eut lieu en France surtout dans les aciéries du centre qui travaillaient déjà en 1880 pour la marine et la guerre fournissant des projectiles en aciers, des blindages en Fer et des canons en aciers.

En regard de l'allègement de la construction, l'architecture en acier tend à devenir une architecture du vide, de l'espace et de la transparence. Avec ce nouveau matériau précisément, la matière s'efface et commence l'histoire des gratte-ciel américains. [11,12]

II.2.1. Normalisation :

Toutes les combinaisons d'alliages ne sont pas utilisés. Seule certains nombres d'entre eux sont employés pratiquement. Il est nécessaire de les désigner de façon claire afin d'éviter les confusions, la désignation normalisée française des aciers se fait suivant plusieurs modes selon la catégorie d'acier.

La désignation conventionnelle des aciers d'usage générale ne nécessitant pas de traitement thermique est fondée sur des caractéristiques mécaniques ou sur des caractéristiques particulières.

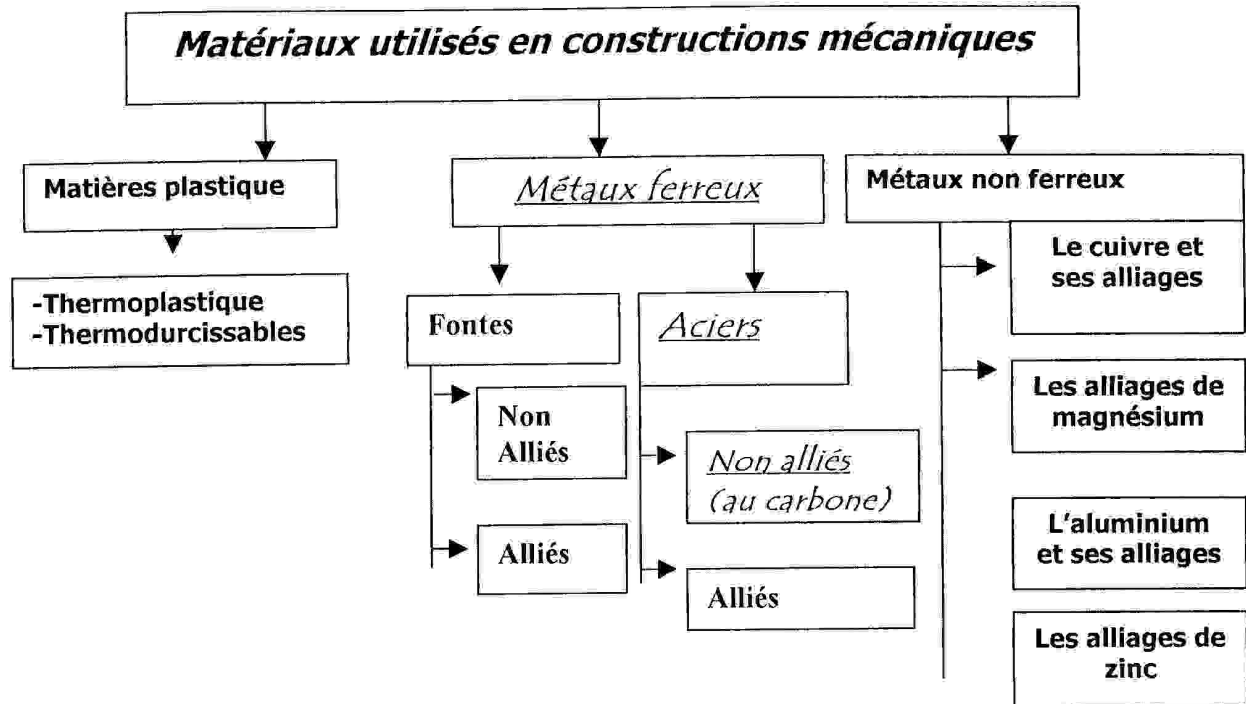


Fig. 2-1- Matériaux utilisés en constructions mécaniques

II.2.2. Définition des aciers :

Un Acier est un alliage constitué essentiellement du fer et du carbone, et contenant plusieurs autres inclusions ou impuretés (Mn, Si, Cr, S, O, M, H,.....etc.) qui influent sur toutes ces propriétés. La concentration en carbone varie de 0,03% à 1,8%.

l'acier est le métal le plus utilisé dans l'industrie, ce grand succès tient à quatre causes essentielles.[13]

- Prix de revient peu élevé ;
- Facilité de mise en œuvre par des procédés variés ;
- Excellentes propriétés mécaniques ;
- Obtention facile des propriétés variées ;
 - *En agissant sur la composition chimique
 - **en réalisant des traitements thermiques.
 - ***et les deux ensembles.

II-3 : Classification des Aciers au carbone :

On peut classer les aciers selon leur composition, en adoptant cette dernière en quatre familles :

- Les aciers au carbone d'usage général ;
- Les aciers des traitements thermiques, alliés ou non alliés ;
- Les aciers à outils ;
- Les aciers inoxydables.

II.3.1- Aciers d'usage générale :

II.3.1.1 Aciers pour constructions mécaniques :

La désignation des aciers non alliés d'usage général destiné aux constructions mécaniques est comme suit :

- . Lettre A (Acier).
- . Résistance R_m en $[\text{daN/mm}^2]$, soit aussi en MPa.
- . Indice de qualité de 1 à 4.
- . Les indices d'utilisation soudable (s) ou moulable (m).

Exemple : A50-2

Nuances normalisées : A33-A34-A50-A60-A70.

III.4.1.2 Acier pour construction métallique :

La désignation comprend dans l'ordre

- Lettre E.
- Limite élastique minimale R_e en daN/mm^2 .
- Indice de qualité de 1 à 4.
- Les indices d'utilisation S ou M.

Exemple : E24-2

Nuances normalisées E24-E26-E30-E36

Utilisation : charpente métallique... etc.

II-4 : Aciers Alliés

II.4.1 Définition :

Les aciers alliés sont les aciers ordinaires $C\% \leq 2\%$ avec les éléments d'addition ces derniers sont ajoutés volontairement pour obtenir des propriétés spéciales.

Les principaux éléments d'addition sont indiqués ci-dessous en même temps que leur symbole chimique et leur symbole normalisé souvent différent du précédent.

Élément	Symbole chimique	Symbole normalisé
Aluminium	Al	A
Chrome	Cr	C
Cobalt	Co	K
Cuivre	Cu	U
Manganèse	Mn	M
Molybdène	Mo	D
Nickel	Ni	N

Niobium	Nb	NB
Phosphore	P	P
Plomb	Pb	PB
Silicium	Si	S
Soufre	S	F
Titane	Ti	T
Tungstène	W	W
Vanadium	V	V

Tableau II-1: symbole chimique et leur symbole normalisé

II.4.2. Désignation des aciers alliés :

Elle est basée sur la composition chimique moyenne du métal.

II.4.2.1. Aciers faiblement alliés :

Ce sont des aciers dont lesquels aucun des éléments alliés (d'addition) n'a une teneur supérieure à 5%.

Ces aciers sont désignés par :

- Un nombre égal à la teneur moyenne en carbone, multiplié par 100% ;
- Une série de symboles normalisés, correspondant aux éléments alliés rangés par teneurs décroissantes ;
- Un ou deux nombres indiquant la teneur moyenne des éléments principaux et qui sont obtenus en multipliant la teneur en % par :
4 pour C,K,M,N,S.
10 pour tous les autres éléments

exemple : 18 NCW- 16-08-10.

Acier faiblement allié

- 0,18% de carbone.
- N4 – 4/16 : %de Nickel.
- C2-4/08 : % Chrome.
- W1-10/10 : % tungstène.

Utilisation : en arbres, axes, bielles,

II.4.2.2. Aciers fortement alliés :

Ce sont des aciers dans lesquels au moins un des éléments d'alliage a une teneur supérieure ou égale à 5% ils sont désignés par :

- la lettre Z
- la teneur moyenne en carbone, exprimée en centièmes pour cent.
- la série des symboles normalisés des éléments alliés rangés par teneurs décroissants.

- teneurs en pourcentage des principaux éléments rangés dans le même ordre et sans coefficient multiplicateur.

Exemple 1 :

Z10CN-18-08

- Z : symbole « acier fortement allié ».

- 0,10% de carbone.

- 18% de chrome.

- 08% de Nickel.

Exemple 2 :

Z120M-12

- Z : symbole des aciers fortement alliés.

- 1,2 %de carbone.

- 12 % de Mn.

Utilisation en moulage, tôles, bagues d'usure, tubes rouleaux.

Remarque :

♦ **Acier contenant 0,83%C :**

Dans ce cas l'acier est constitué d'un seul constituant (perlite pure), il est dit eutectoïde.

♦ **Acier contenant de 0,008%C à 0,83 %C :**

Dans ce cas d'acier, toute la cémentite avec une certaine masse de ferrite, forment de la perlite (la ferrite reste en excès). Ces aciers sont dits hypoeutectoïdes et sont constitués de deux constituants (P+F libre).

♦ **Aciers contenant de 0,83 à 1.7%C :**

Dans ces aciers, toute la fonte avec une certaine masse de la cémentite, forment de la perlite (la cémentite reste en excès). Ces aciers sont dits hypereutectoïdes et sont formés de deux constituants (perlite + cémentite libre).[14]

II-5 : Rôle des éléments d'alliage

II.5.1.Eléments d'alliage:

Lors des opérations de mise en forme [15], avec ou sans enlèvement de copeaux, les outils sont soumis à des sollicitations extrêmement complexes et propriétés requises au niveau des aciers pour tels emplois sont les suivantes :

- ♦ Une Grande dureté, pour résister aux déformations généralisées ou localisées de la surface lors du travail par renforcement ou par cisaillement du métal ou, par pénétration dans ce dernier pour enlever une partie sous forme de copeaux ; suivant l'emploi auquel est destiné l'outil (travail à froid ou à chaud). On attache plus ou moins d'importance au fait que la dureté persiste lorsque l'acier est porté à température élevée ;
- ♦ Une bonne résistance à l'usure, c'est-à-dire la résistance à l'arrachement de particules lors du frottement contre une autre surface ;
- ♦ Une absence de fragilité, notamment dans les emplois pour les quels l'outil est soumis à des chocs fréquents ;

- ♦ Une bonne résistance aux chocs thermiques, surtout dans les aciers pour moules, les outillages de forge et les cylindres de laminage à chaud qui sont soumis à des changements de température brusques et répétés ;
- ♦ Une bonne trempabilité pour que la structure soit homogène, sur des très grandes épaisseurs, après le traitement thermique de la trempe. Cette dernière propriété doit être complétée par une résistance convenable à la surchauffe et au grossissement du grain. Cet ensemble de caractéristiques peut être atteint si on ajoute à l'acier au carbone un certain nombre d'éléments d'alliage que nous allons énumérer.

Carbone (C)

C'est l'élément essentiel pour durcir l'acier. Au-delà de 0,6% de carbone, on atteint la zone des aciers à outils caractérisée par de hauts niveaux de dureté et qui correspond au domaine des aciers de travail à froid et des aciers à coupe rapide. Il faut noter que l'augmentation progressive de la teneur en carbone conduit à un abaissement de la température de liquides et de solides et, par voie de conséquence, à une réduction des domaines de température correspondent à la transformation à chaud et au traitement thermique.

Manganèse (Mn)

Le manganèse est une impureté (désoxydant) dans les aciers, sa teneur ne dépasse pas 0,8% il forme avec le carbone : le carbure de manganèse (Mn_3C) plus stable que Fe_3C . Le manganèse augmente la résistance à la rupture et la limite élastique sans diminuer la plasticité.

Silicium (Si)

Le silicium désoxyde aussi l'acier (impureté) sa teneur ne dépasse pas 0,4%. Le silicium se dissout dans la ferrite et augmente la résistance à la rupture et augmente aussi fortement la limite élastique, mais il diminue la plasticité.

Soufre (S)

Le soufre dans les aciers au carbone est une impureté néfaste. Il forme avec le fer une combinaison chimique Fe-S insoluble dans le fer. Fe-S forme avec le fer un eutectique facilement fusible (988°C). Dans ce cas nous ne pouvons pas utiliser la déformation à chaud. La teneur en soufre dans les aciers ne doit pas dépasser 0,035%.

Phosphore (P)

Le phosphore, est une impureté soluble dans le fer (α et γ). Si sa teneur est assez grande, elle forme le phosphure de fer (Fe_3P). Il augmente la limite élastique et la charge de rupture, tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité. Sa teneur ne doit pas dépasser 0,045% dans les aciers.

Hydrogène (H)

L'hydrogène se dissout dans les aciers généralement sous forme atomique. Il exerce une forte action fragilisante sur l'acier. La teneur en hydrogène ne doit pas dépasser 0,001% dans les aciers.

Oxygène (O)

L'oxygène est une impureté qui forme les oxydes avec le Mn, Si, Fe, Al...etc. (inclusions non métallique). Ces derniers en se concentrant aux joints des grains, augmentent la dureté et la fragilité. C'est pourquoi la teneur en oxygène doit être diminuée pendant la production des aciers.

Azote (N)

L'azote forme aussi avec le fer et les autres éléments des inclusions non métalliques (nitrures) comme Fe_2N , Fe_4N , ...etc. Les nitrures se cristallisent à l'état dispersé comme aux joints et dans le volume de grains. L'azote augmente la résistance à la rupture, la limite élastique et aussi la résilience. Donc il faut introduire spécialement l'azote dans les aciers.

Eléments d'alliages	Symboles chimiques	Caractéristique du métal					Transformation de forme		
		Rr	Re	A%	H	K	usinabilité	forgeabilité	Soudabilité
Carbone	C	++	+	-	++	-	-		-
Chrome	Cr	++	+	+	++	-	-		
Manganèse	Mn	++	+	+	++	+	-	+	+
Molybdènes	Mo	++	+	+	+	+	+	+	+
Silicium	Si	+	++		+		-		-
Nickel	Ni	+		++	+				
Cobalt	Co	+				+			
Vanadium	V	+	+	+	+	+		+	+
Tungstène	W	+		+	+	+			
Phosphore	P	+		-	+		+		
Soufre	S	+		-			+	-	-

Remarque :

+ Augmentation

++ forte augmentation

-Diminution

Tableau II-2 Rôle des éléments d'alliages sur les propriétés des métaux

Réactions chimiques liées au soudage

Le bain de fusion subit une évolution de sa composition chimique à cause de nombreuses réactions dont il est le siège. Au sein du métal fondu, il s'agit de réactions entre éléments :

- Effervescence :



Cette réaction provoque des soufflures au niveau de la soudure. Pour calmer l'acier il faut ajouter des éléments désoxydants tel que Mn, Si, Al...

- Affinage :

Réaction de désoxydation, de dé nitruration de désulfuration.

Absorption des gaz**Absorption de l'hydrogène**

L'hydrogène absorbé favorise :

La formation des soufflures ;

La formation des « fish eyes » ; taches claires appelées aussi œil de poisson apparaissant dans les faciès de cassure des pièces soudées.

Pour éviter l'absorption de l'hydrogène, on fera un pré chauffage pour réduire la vitesse de refroidissement ou un post chauffage pour faciliter le dégagement de ce gaz.

Absorption de l'oxygène

Elle abaisse la résistance à la rupture, la dureté et la résilience. L'oxygène se présente sous forme d'oxydes type : FeO.

Absorption de l'azote

L'azote est absorbé en faibles quantités, sa présence se traduit par :

Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique ;

Diminution de l'allongement pour-cent et du coefficient de striction.

Composition chimique du métal de base et problème de fissuration à chaud

Le carbone, le soufre, le phosphore et le nickel contribuent à la fissuration à chaud ;

- La ductilité à chaud de l'acier décroît quand sa teneur en carbone croît,

- Si le soufre a une teneur assez forte, sous forme de Fe-S, le risque de fissuration est élevé. Il faut exiger une teneur moins de 0.04 % à la coulée, toutefois l'effet néfaste est réduit par l'addition de manganèse.

- *Pour des teneurs en carbone allant jusqu'à 0.20% il faut limiter la teneur en carbone à 0.04% à la coulée.*

II.6. propriété des aciers

Le point de liquéfaction des aciers varie de 1350 °C à 1450°C et ce suivant la teneur en carbone.

Il est remarqué que :

La dureté et la résistance à la traction dépendent du pourcentage de carbone. La résistance au choc et la malléabilité diminuent quand la teneur en carbone augmente : c'est la résistance à la rupture qui permet de caractériser un acier.

II.7. structure cristalline des aciers

le fer présente deux structures cristallines différentes soit à cube centré (C.C) ou à face centrée (C.F.C).

II.7.1. Fer α :

jusqu'à 906 °C, on trouve le fer se cristallise dans le système (C.C) (fig. 2-2) et on le nomme fer α .

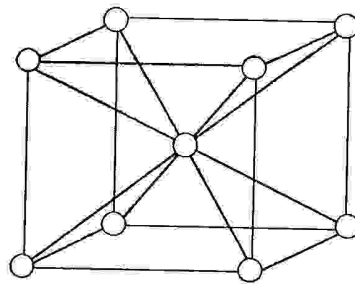


Figure 2-2 : Cubique centrée

II.7.2. Fer γ :

Au-dessus de 906 °C on trouve le fer γ qui est obtenu en chauffant le fer α et qui prend une nouvelle maille cristalline dite cubique à face centrée (C.F.C) (fig. 2-3).

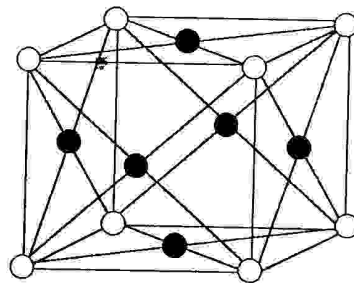


Figure 2-3 : Cubique à faces centrées

II.7.3. Fer δ :

Enfin à 1401°C une nouvelle transformation se produit. Le fer reprend une structure (C.C) analogue à celle du fer α avec une différence due aux dimensions des arrêtes.

II.8.Aspects micrographiques des constituants d'aciers

II.8.1. Les constituants d'équilibre :

II.8.1.1. La ferrite (fig. 2- 4):

C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer α à un réseau cubique centrée (C.C) à distance réticulaire de 2,8606 Å jusqu'à 768 C° le fer α est magnétique les caractéristiques mécaniques de la ferrite sont :

- Dureté HB = 80.
- Résistance à la rupture $R_r \approx 30 \text{ dan/mm}^2$
- Résilience $K \approx 30 \text{ Kg m/cm}^2$.
- Allongement $A \approx 35\%$.
- La masse volumique $P \approx 7,86 \text{ Kg/dm}^3$.

Les réactifs habituels ne le colorent pas mais révélant les joints de ses grains.[16,17]

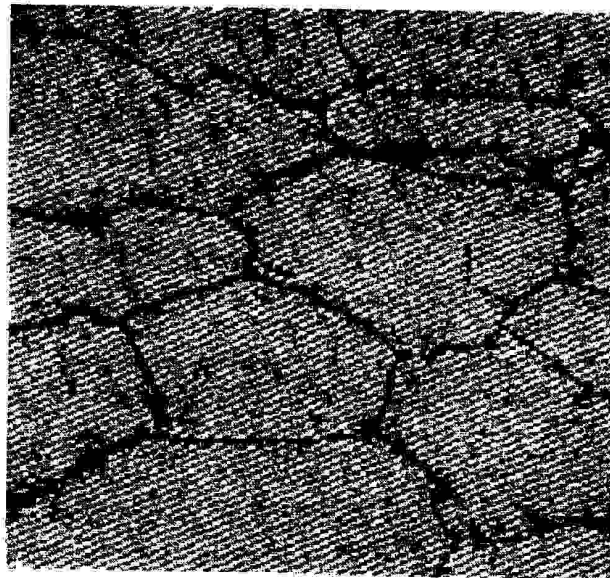


Figure 2-4 : La ferrite

II.8.1.2. Cémentite (fig. 2-5) :

C'est une combinaison chimique du fer et du carbone (Fe_3C) elle se forme pendant la cristallisation primaire des alliages fer/carbone sa composition correspond à une teneur de 6,67%C. Les caractéristiques mécaniques de la cémentite sont:

- Dureté HB = 800 très dure
- Fragile $k=0$
- Résistance a la rupture $R_r = 200 \text{ daN/mm}^2$ [16,17]

- Allongement $\approx 0\%$.
- La masse volumique $P = 7,82 \text{ kg/dm}^3$ elle n'est colorée que le picrate de sodium à l'ébullition.

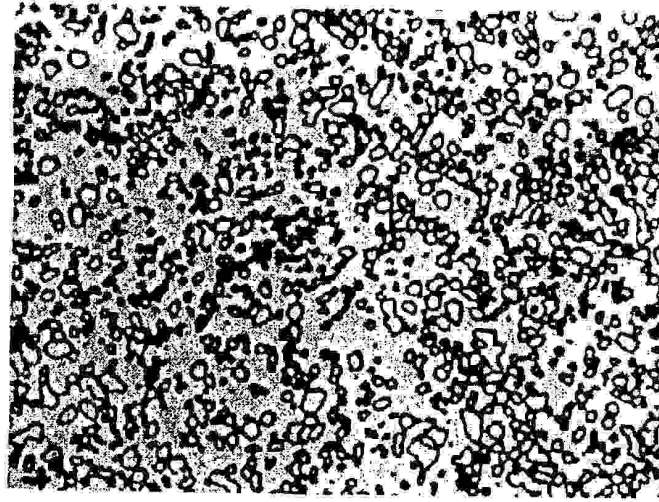


Figure 2-5 : Cémentite globulaire

II.8.1.3. La perlite (fig. 2-6) :

C'est un mélange mécanique de deux phases (ferrite + cémentite) elle se cristallise de l'austénite à la teneur du carbone 0,85%.

Généralement sous forme lamellaire chaque grain est formé de lamelles alternées et de cémentite dont l'épaisseur et les écarts dépendent de la vitesse de refroidissement. La distance entre deux lamelles 0,28 et 0,35 μm . La perlite est :

- dure (HB=200 environ)
- résistance à la rupture (R= 850 environ)
- assez ductile (A=10)
- elle est colorée par les réactifs habituels acides. La cémentite apparaît en gris clair et la perlite est uniformément en gris foncé, la perlite existe aussi sous forme globulaire, ou la cémentite apparaît en petits grains blancs de contour noir sur un fond de ferrite.[16,17]

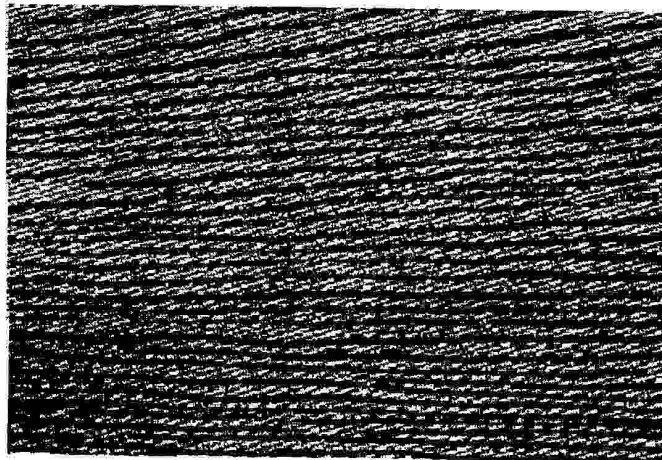


Figure 2-6 : Perlite

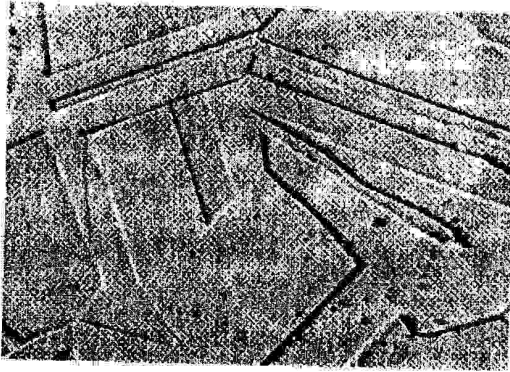
II.8.2. Constituants de transition

II.8.2.1. L'austénite (fig. 2-7) :

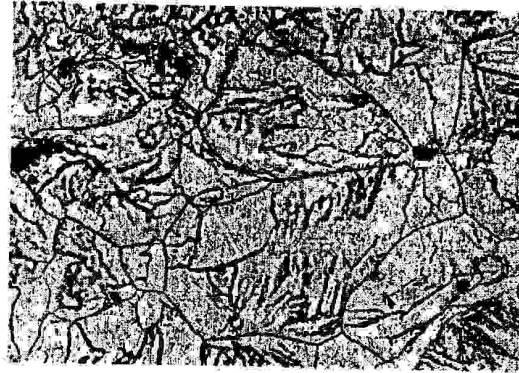
C'est une solution solide de carbone dans le fer γ elle est stable à haute température. L'austénite est cubique à face centrée (CFC).

Les caractéristiques mécaniques de l'austénite sont :

- Dureté HB = 300.
- Résistance à la rupture $R_r = 50 \text{ daN/mm}^2$.
- Resilience $K = 30 \text{ Kg.m/cm}^2$.
- Allongement $A \approx 60 \%$. [16]



a- L'austénite surchauffée
1000 : 1



b- L'austénite recristallisée
800 : 1

Figure 2-7 : L'austénite

II.8.3 Les constituants hors d'équilibre

Les nombres de dureté donnés à titre indicatif correspondent à une teneur en carbone moyenne de 0,85% (teneur de l'eutectoïde).

La martensite

Elle est constituée par une solution saturée du carbone solide dans le Fer γ . Elle est dure mais fragile HB ≈ 750 [18]

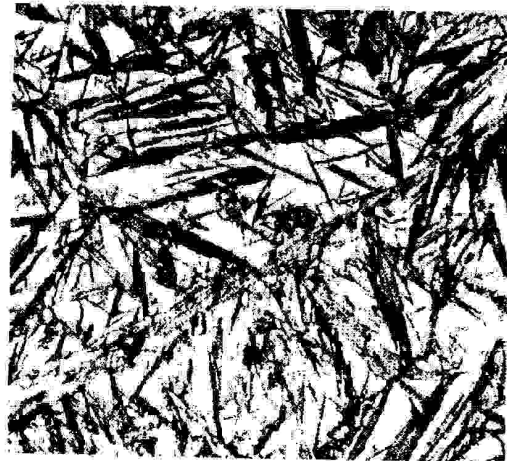


Figure 2-8 : martensite

La troostite

S'obtient à partir de l'austénite par refroidissement à vitesse moyenne, c'est un agrégat ferrite + cémentite. HB = 250 à 400

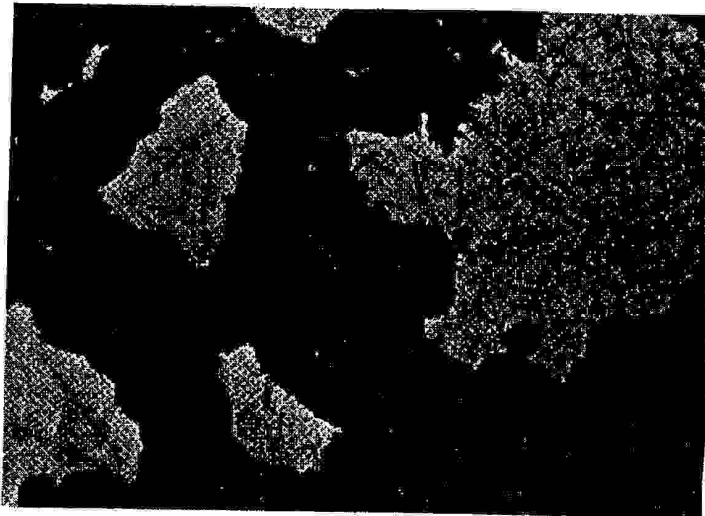


Figure 2-9 : troostite primaire

La Sorbite

Sa constitution physico-chimique et sa structure sont analogues à celles de la troostite. Elle est obtenue par réchauffage d'un acier trempé martensitiquement (revenu).
HB \approx 300 à 500



Figure 2-10 : Sorbite

La bainite

Constituant obtenu:

- soit par trempe isotherme bainitique.
- soit directement par refroidissement.

La bainite est un agrégat de carbure et de ferrite plus ou moins saturé en carbone.
HB \approx 500 – 540 [18]

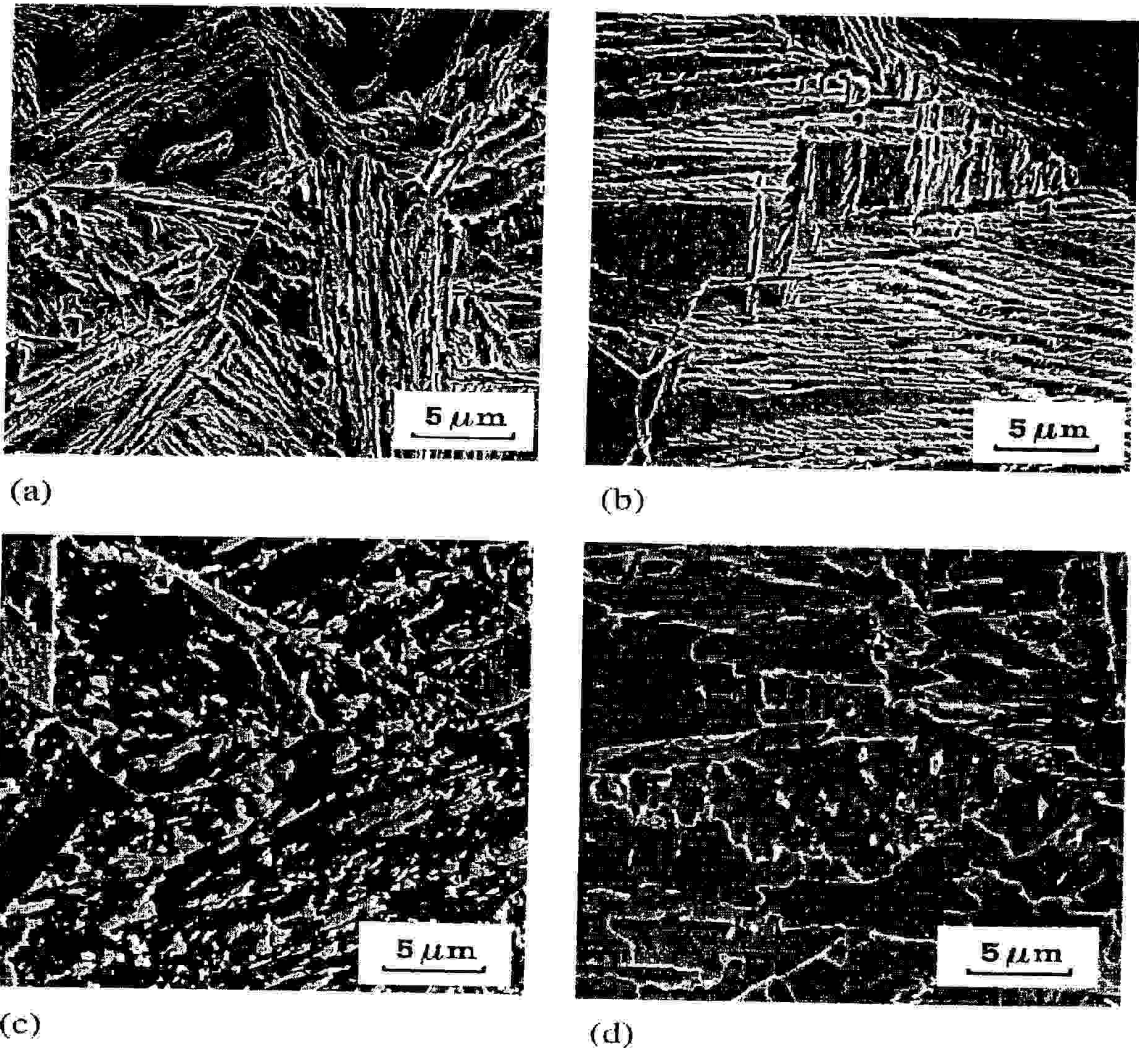


Figure 2-11.: Micrographie électronique à balayage montrant divers formes de constituants bainitiques dans les aciers- a) bainite supérieure ; b) bainite inférieure ; c) bainite granulaire ; d) bainite à très bas carbone.

II.9 : Les diagrammes d'équilibre (fig. 2-12) :

Les diagrammes d'équilibre représentant la variation des limites des domaines d'existence des phases à l'équilibre thermique en fonction de la température et de la composition, leur utilisation est précieuse pour la prévision de transformation telles que la fusion, la solidification et les changements de phase.

II.9.1. Les diagrammes Fer-carbone :

Les diagrammes fer-carbones se solidifient en donnant naissance aux solutions solides interstitielles (ferrite, austénite), d'une part, et à de la Cémentite ou du graphite d'autre part. Deux diagrammes peuvent être établit.

-Un diagramme Fer-carbone à Cémentite (Fe_3C) appelé diagramme métastable.

Les atomes de carbone remplissent plus ou moins les interstices ou, les vides laissés entre les atomes de fer de chaque maille.

Les caractéristiques de la structure de base sont modifiées, le fer devient acier ou fonte avec de meilleures propriétés.

Sous certaines conditions d'équilibre, le carbone peut s'amalgamer, sans dissolution, au fer pour former du carbure Fe_3C ou cémentite qui contient 6,67%C, pourcentage maximal d'absorption.

Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite (6,67%C, matériaux fragiles, cassant, très dure) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux :

Les aciers (entre 0,008% et 1,7%) et les fontes (de 1,7% à 6,67%C).

Ligne A_1 (723°C)

Elle marque la fin de la transformation de la perlite, mixture de fer contenant 0,83%C, en austénite, au-dessus de 723°C la perlite n'existe plus.

Ligne A_3

Elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite, la ferrite n'existe plus au-dessous de cette ligne.

Ligne A_{cm}

Elle indique la fin de la dissolution, après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

Symboles A, r et c

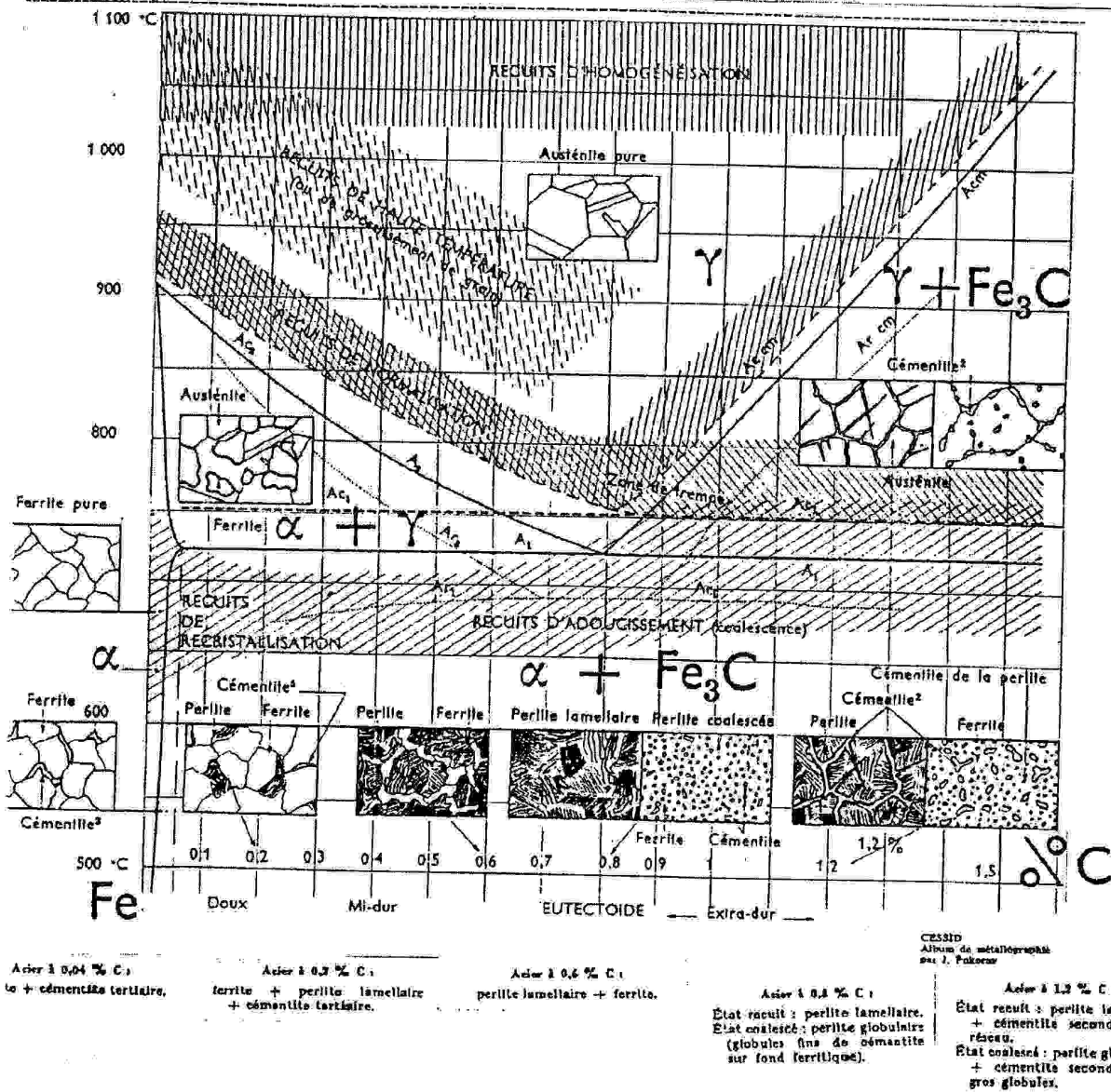
Ils sont normalisés, aux normes internationales, le symbole A est utilisé pour arrêt, r pour refroidissement et c pour chauffage. [14]

Exemple :

Ar_1 signifie passage de la ligne A_1 lors d'un refroidissement,

Ac_3 passage de A_3 lors d'un chauffage.

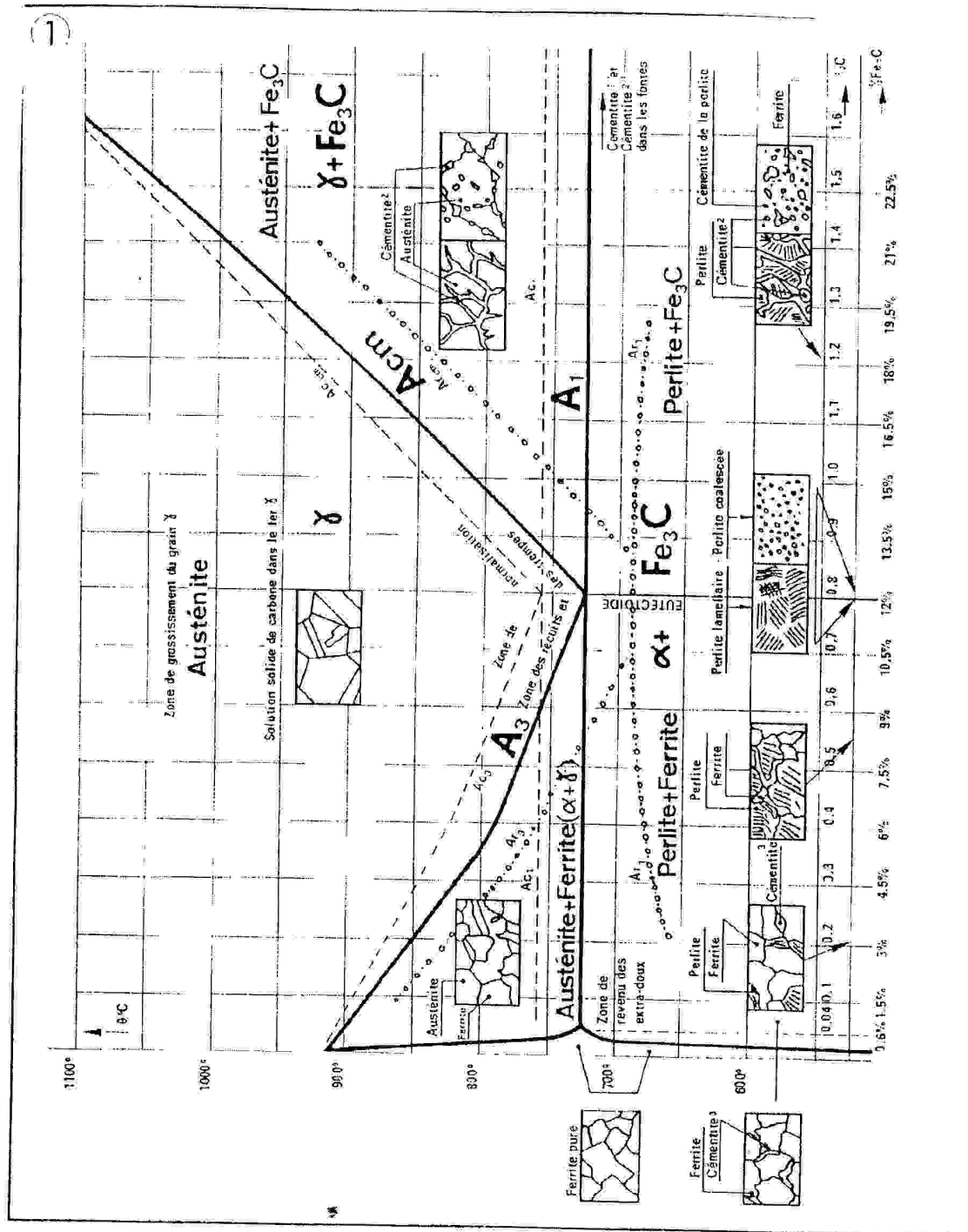
A_1 : Transformation Eutectoïde-perlitique.....	727°C
A_2 : Transformation magnétique.....	768°C
A_3 : Transformation alpha-gamma.....	906°C
A_4 : Transformation Gamma-Delta.....	1401°C



ACIERS AU CARBONE. POINTS DE TRANSFORMATION (1)

La position des lignes A_1, A_2, A_{cm} varie avec la teneur en Mn, Si, P, Ni, Cu... celle des lignes Ac et Ar varie de plus avec la vitesse $\frac{d\theta}{dt}$ et avec la «propreté» de l'acier.

Figure 2-12-a : Diagramme Fer-C



ACIERS AU CARBONE

9.21.1. D'après Pokorný, la position des lignes A₁, A₂, A₃ varie avec la teneur en Mn-Si-P. La position des lignes Ac₁ et Ac₂ varie de plus avec d'effet et la pureté de l'acier.

Figure 2-12-b : Diagramme Fer-C

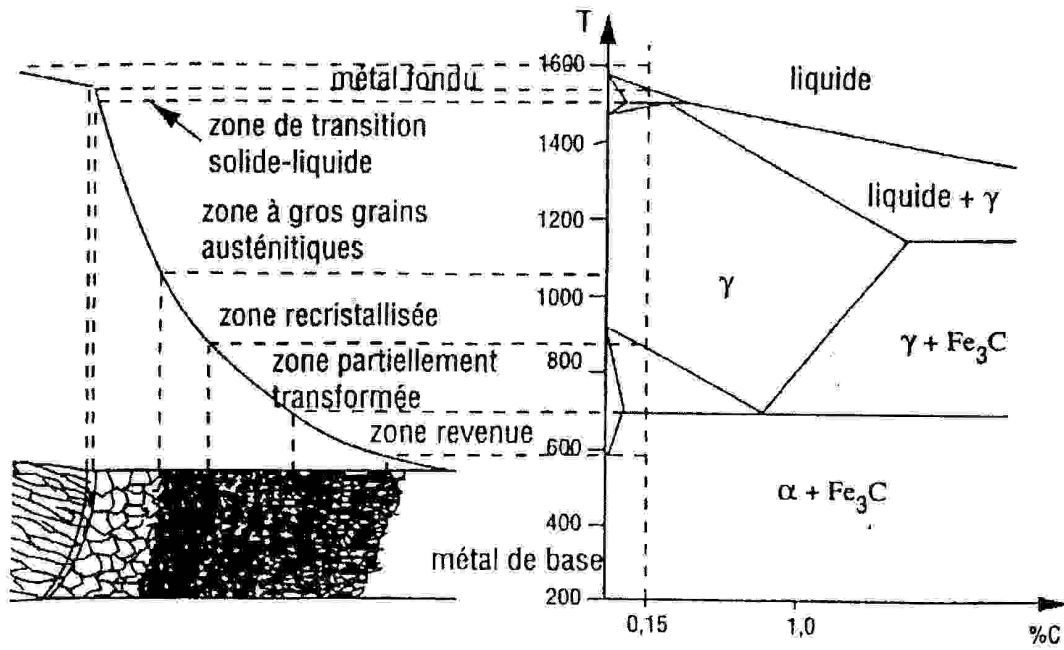


Figure 2-12-c

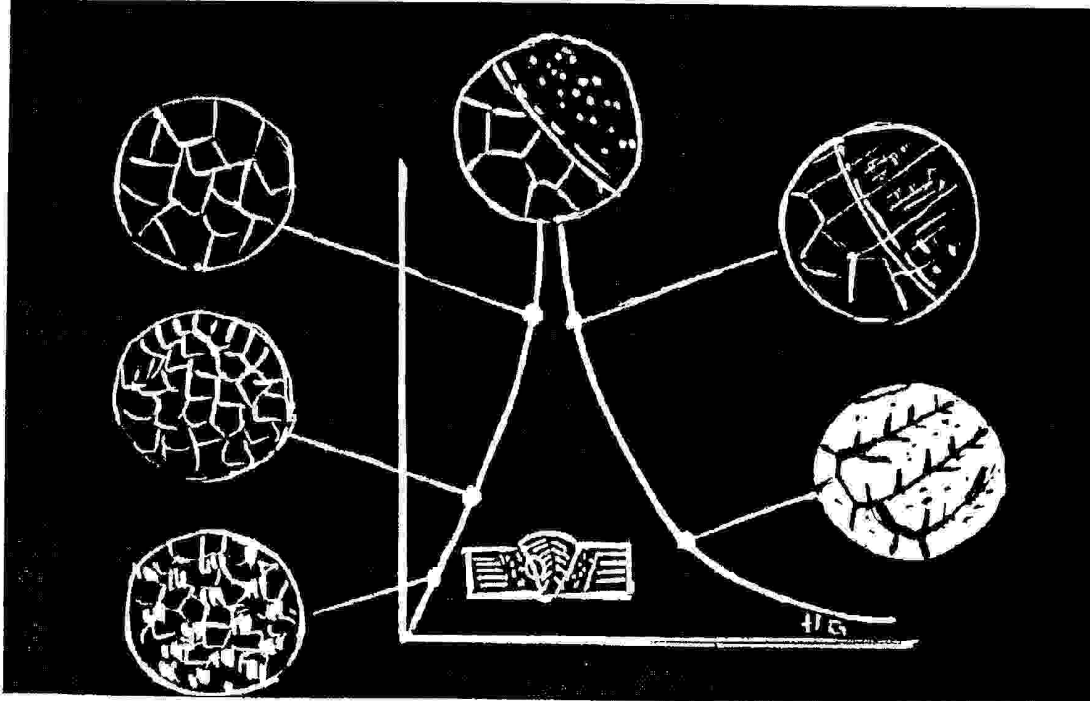


Figure 2-12-d

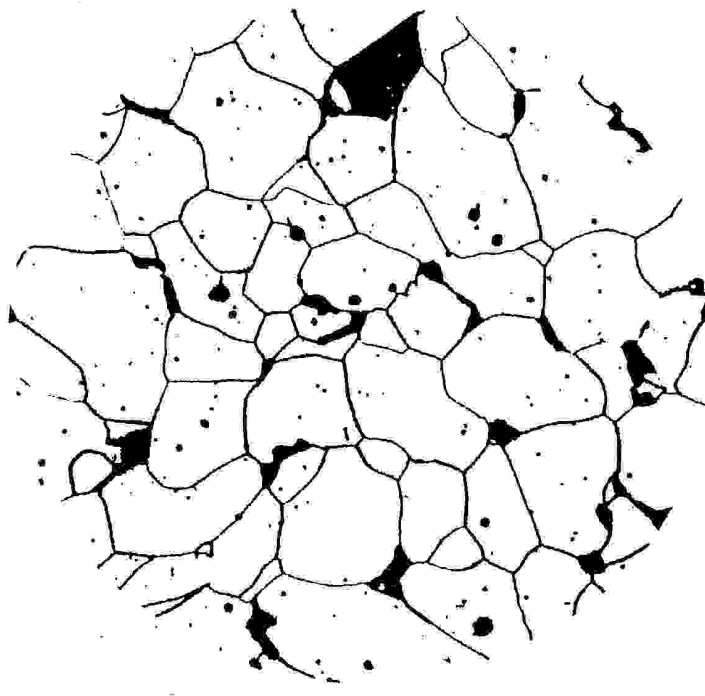


Figure 2-13 : Structure ; Ferrite + Pearlite + Scories.[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier au carbone laminé à chaud</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.05 %mass.</i> <i>Si : 0.01 %mass.</i> <i>Mn : 0.27 %mass.</i> <i>S : 0.03 %mass.</i> <i>P : 0.09 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =110.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Ferrite+ Pearlite+ scories.</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier non calmé ;</i> <i>Concentration élevée de Phosphore</i> <i>(Acier thomes) .</i>

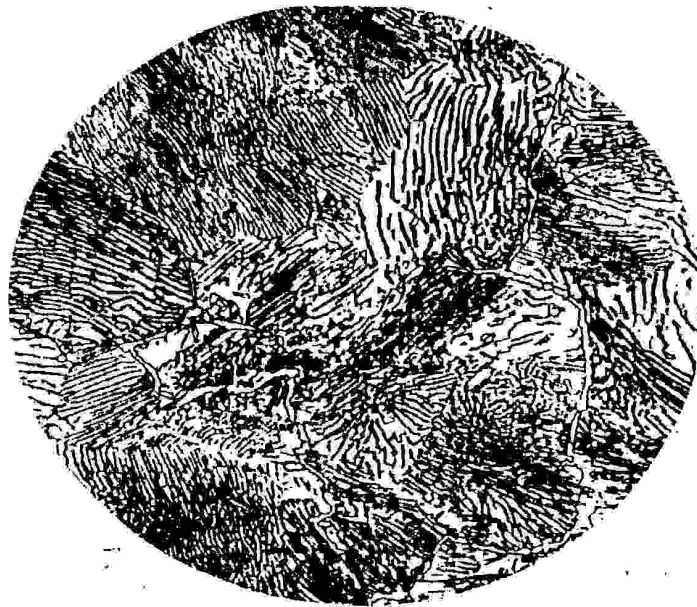


Figure 2-14 : Structure ; Perlite + Cémentite.[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier au carbone laminé à chaud</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 1.35 %mass.</i> <i>Si : 0.13 %mass.</i> <i>Mn : 0.11 %mass.</i> <i>S : 0.024%mass.</i> <i>P : 0.022 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ = 311.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Perlite + cémentite.</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier calmé par addition du Fe-Si</i> <i>avant la coulée .</i>

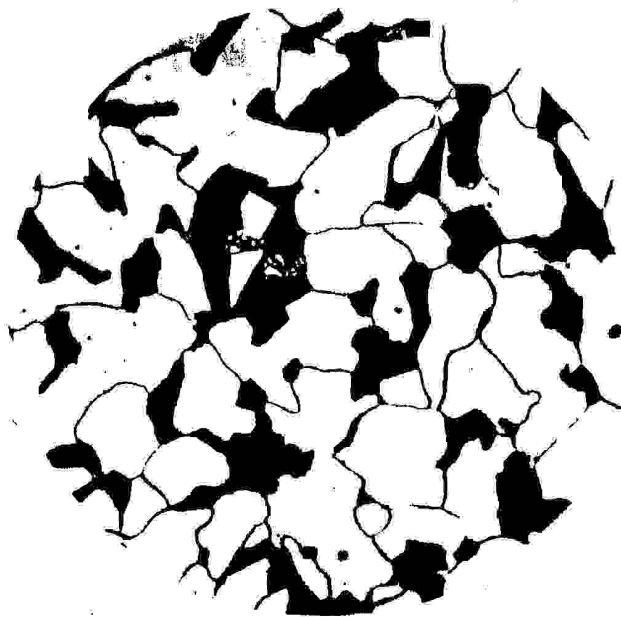


Figure 2-15 : Structure ; Ferrite + Pearlite. [19]

<i>Matière</i>	<i>Acier au carbone laminé à chaud</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.15 %mass.</i> <i>Si : 0.30 %mass.</i> <i>Mn : 0.70 %mass.</i> <i>S : 0.03 %mass.</i> <i>P : 0.035 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =155.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Ferrite+ Pearlite.</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier calmé par addition du Fe-Si avant la coulée .</i>

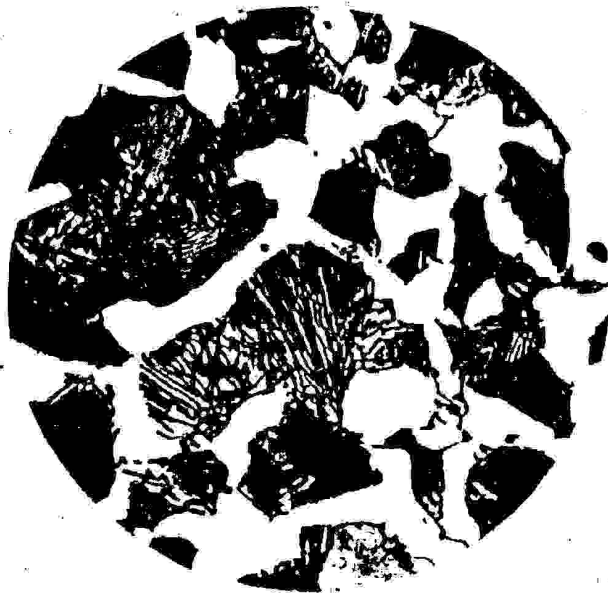


Figure 2-16 : Structure ; Ferrite+ Pearlite .[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier au carbone laminé à chaud</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.50 %mass.</i> <i>Si : 0.30 %mass.</i> <i>Mn : 0.70 %mass.</i> <i>S : 0.035 %mass.</i> <i>P : 0.030 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =204.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Pearlite + Ferrite.</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier calmé par addition du Fe-Si</i> <i>avant la coulée .</i>

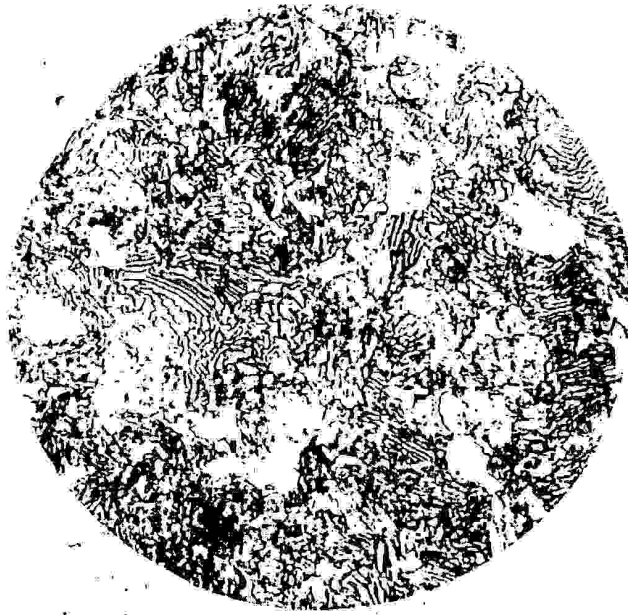


Figure 2-17 : Structure ; Perlite.[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier au carbone laminé à chaud</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.85 %mass.</i> <i>Si : 0.20 %mass.</i> <i>Mn : 0.25 %mass.</i> <i>S : 0.025 %mass.</i> <i>P : 0.015 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =278.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Perlite.</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier calmé avec Fe-Si.</i>

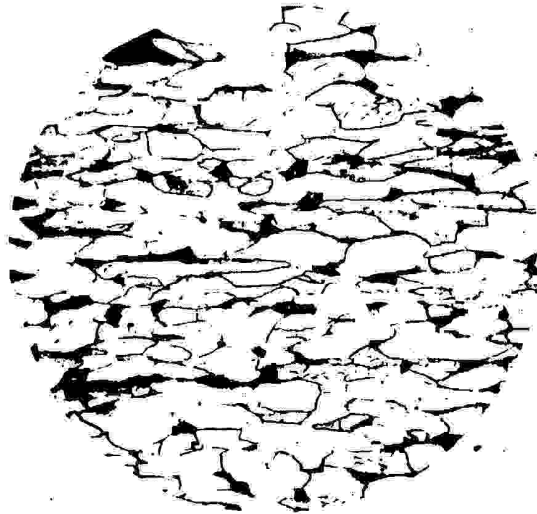


Figure 2-18 : Structure ; Ferrite+ Perlite (étirées) .[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier au carbone laminé à froid.</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.15 %mass.</i> <i>Si : 0.30 %mass.</i> <i>Mn : 0.70 %mass.</i> <i>S : 0.03 %mass.</i> <i>P : 0.035 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =242.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant + Polissage avec poudre de diamant + Attaque chimique avec solution alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Ferrite+ Perlite (étirées).</i>
<i>Observation</i>	<i>Degré de laminage 50% un recuit de recristallisation est souvent nécessaire.</i>

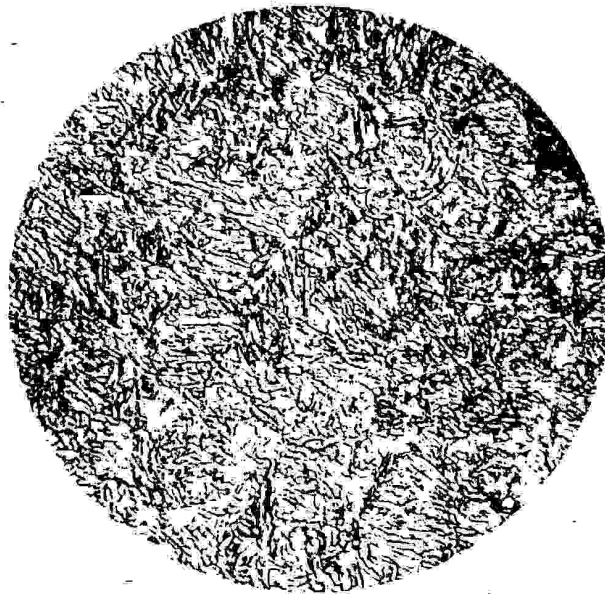


Figure 2-19 : Structure ; Martensite.[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier trempé.</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.50%mass.</i> <i>Si : 0.30 %mass.</i> <i>Mn : 0.70 %mass.</i> <i>S : 0.035 %mass.</i> <i>P : 0.030 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =769.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Martensite.</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier trempé dans un bain de sel (840°C).</i>

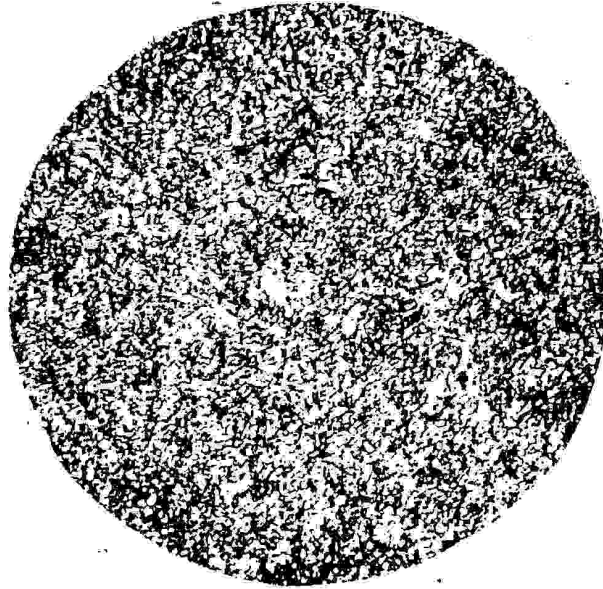


Figure 2-20 : Structure ; Martensite fine + Grains de Cementite.[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier trempé.</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 1.02 %mass.</i> <i>Si : 0.20 %mass.</i> <i>Mn : 0.40 %mass.</i> <i>S : 0.03 %mass.</i> <i>P : 0.02 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =958.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Martensite fine + Grains de cementite.</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier trempé dans un bain de sel à 775°C, la cémentite ne peut se dissoudre complètement.</i>



Figure 2-21 : Structure ; Martensite + Troostite.[19]

La troostite : Très fines lamelles de perlite qui apparaissent souvent sous forme de rosettes.

<i>Matière</i>	<i>Acier trempé.</i>
<i>Analyse</i>	<p><i>C : 0.45 %mass.</i></p> <p><i>Si : 0.25 %mass.</i></p> <p><i>Mn : 0.48 %mass.</i></p> <p><i>S : 0.024 %mass.</i></p> <p><i>P : 0.062 %mass.</i></p>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =614.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<p><i>Rectification avec lubrifiant+</i></p> <p><i>Polissage avec poudre de diamant+</i></p> <p><i>Attaque chimique avec solution alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i></p>
<i>Agrandissement</i>	<i>1400 fois.</i>
<i>Structure</i>	<p><i>Martensite + troostite.</i></p> <p><i>La troostite : Très fines lamelles de perlite qui apparaissent souvent sous forme de rosettes.</i></p>
<i>Observation</i>	<p><i>La troostite se forme entre 500 et 700°C lors d'un refroidissement brusque; la troostite est moins dure que la martensite.</i></p>



**Figure 2-22 : Structure ; Martensite tétragonale grossière
+ austénite .[19]**

<i>Matière</i>	<i>Acier trempé.</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 1.50 %mass. Si : 0.25 %mass. Mn : 0.35 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =783.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+ Polissage avec poudre de diamant+ Attaque chimique avec solution alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Martensite tétragonale grossière + austénite .</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier trempé à 1000°C ; risque d'apparition de fissures.</i>



Figure 2-23 : Structure ; Martensite cubique grossière +austénite.[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier trempé.</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 1.5 %mass.</i> <i>Si : 0.25 %mass.</i> <i>Mn : 0.35 %mass.</i> <i>S : 0.35 %mass.</i> <i>P : 0.35 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =671.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Martensite cubique grossière</i> <i>+austénite.</i>
<i>Observation</i>	<i>Acier trempé à 1000°C + revenu à</i> <i>200°C / 30 min .</i>

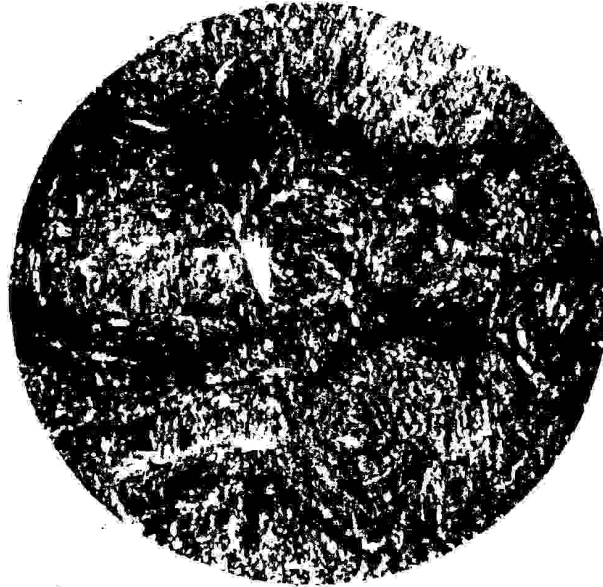


Figure 2-24 : Structure ; Martensite + fissures de trempe.[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier trempé.</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.70 %mass.</i> <i>Si : 0.30 %mass.</i> <i>Mn : 0.40 %mass.</i> <i>S : 0.03 %mass.</i> <i>P : 0.03 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =725.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Martensite + fissures de trempe.</i>
<i>Observation</i>	<i>Les fissures de trempe</i> <i>apparaissent suite à un mauvais</i> <i>traitement thermique.</i>

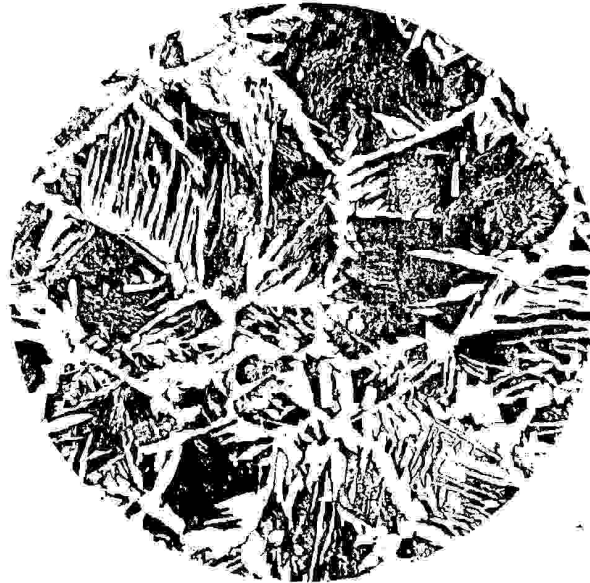


Figure 2-25 : Structure ; Ferrite + perlite (structure de WIDMANNSTAETTEN) .[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier au carbone surchauffé</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.37 %mass.</i> <i>Si : 0.24 %mass.</i> <i>Mn : 0.74 %mass.</i> <i>S : 0.026 %mass.</i> <i>P : 0.052 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =176.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution</i> <i>alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>300 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Ferrite + perlite (structure de WIDMANNSTAETTEN).</i>
<i>Observation</i>	<i>Structure type des aciers surchauffés ;la structure grossière rends l'acier cassant.</i>

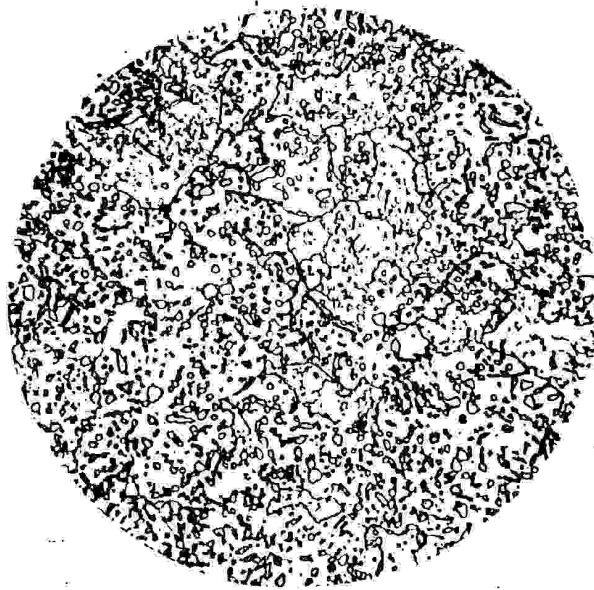
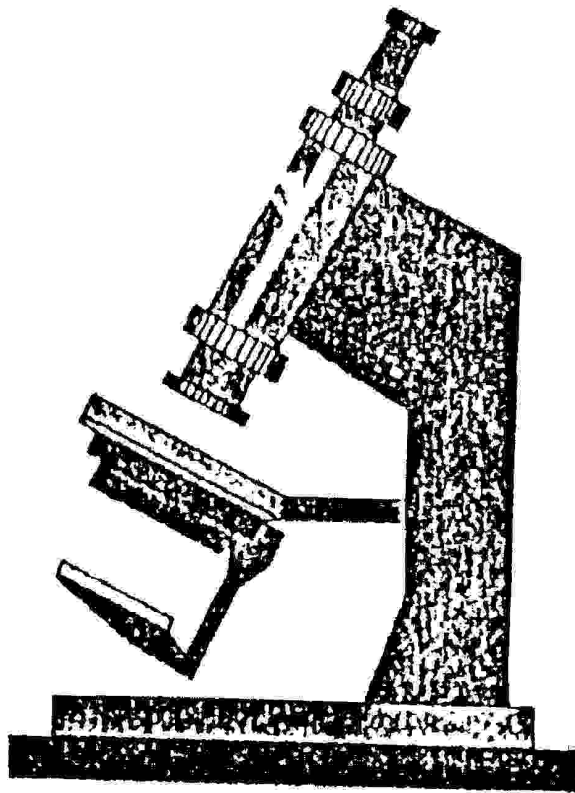


Figure 2-26 : Structure ; Grains de perlite.[19]

<i>Matière</i>	<i>Acier au carbone + recuit d'adoucissement</i>
<i>Analyse</i>	<i>C : 0.95 %mass.</i> <i>Si : 0.20 %mass.</i> <i>Mn : 0.25 %mass.</i> <i>S : 0.03 %mass.</i> <i>P : 0.035 %mass.</i>
<i>Dureté</i>	<i>HV₃₀ =164.</i>
<i>Préparation pour attaque chimique</i>	<i>Rectification avec lubrifiant+</i> <i>Polissage avec poudre de diamant+</i> <i>Attaque chimique avec solution alcoolique d'acide nitrique à 03 %.</i>
<i>Agrandissement</i>	<i>700 fois.</i>
<i>Structure</i>	<i>Grains de perlite.</i>
<i>Observation</i>	<i>Cet Acier a subi un recuit d'adoucissement à 740°C puis refroidi lentement.</i> <i>Lors d'un recuit les lamelles de cémentite se transforment en globules.</i>

CHAPITRE III
ETUDE EXPERIMENTALE



CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

Caractéristiques mécaniques et compositions chimiques de quelques alliages d'aciers utilisés dans le complexe pelles et grues de Constantine

Caractéristiques mécaniques du Fil de soudure type SG 3-utilisé dans notre travail

Limite élastique	470 N/mm²
Résistance à la traction	590 N/mm²
Allongement	30 %
<u>Composition chimique du Fil à souder SG 3</u>	

C % = 0.07 à 0.14

Si % = 0.8 à 1.20

Mn % = 1.6 à 1.9

Composition chimique de l'acier de base utilisé TQ 46

- **0.21 Maxi**..... C %
- **0.5** Si %
- **1.7**Mn %
- **0.030 Maxi**..... P %
- **0.030 Maxi**..... S %
- **0.12 à 0.2** Ti %

Caractéristiques mécaniques de l'acier de base utilisé TO 46-utilisé dans notre travail

Etat de traitement (V) V : Trempé et revenu - désoxydé	
- Dureté HB 30 :	165 – 212
- Limite élastique R_e 0.2 N/mm² :	460 Mini
- Résistance à la traction R_m N/mm² :	550 – 700
- Allongement A % :	21 Mini
- Résilience K min-Joule :	27 à -20 °C

Composition chimique de l'acier de base utilisé Q 36

- **0.18 Maxi**..... C %
- **0.5** Si %
- **1.6**Mn %
- **0.030 Maxi**..... P %
- **0.030 Maxi**..... S %
- **0.12 à 0.2** Ti %

Caractéristiques mécaniques de l'acier de base utilisé Q 36-utilisé dans notre travail**Etat de traitement (V) V : Trempé et revenu - désoxydé**

- Dureté HB 30	:	145 – 185
- Limite élastique R_e 0.2 N/mm²	:	360 Mini
- Résistance à la traction R_m N/mm²	:	480 – 610
- Allongement A %	:	25 Mini
- Résilience K min-Joule	:	27 à -20 °C

Composition chimique de l'acier de base utilisé NAXTRA 60

- 0.20 Maxi	C %
- 0.4 à 0.8	Si %
- 0.6 à 1	Mn %
- 0.025 Maxi	P %
- 0.025 Maxi	S %
- 0.5 à 0.9	Cr %
- 0.2 à 0.6	Mo %
- 0.04 à 0.1	Zr %

Caractéristiques mécaniques de l'acier de base utilisé NAXTRA 60-utilisé dans notre travail**Etat de traitement (V) V : Trempé et revenu - désoxydé**

- Dureté HB 30	:	210 – 250
- Limite élastique R_e 0.2 N/mm²	:	590 Mini
- Résistance à la traction R_m N/mm²	:	690 – 830
- Allongement A %	:	18 Mini
- Résilience K min-Joule	:	47 à -20 °C

III.1 LA CARBOMETRIE[19]

III.1.1 : Introduction

Le carbone contenu dans le fer ou l'acier est l'élément d'alliage le plus important vu sa grande influence sur les caractéristiques chimiques et mécaniques des pièces métalliques.

La limite de 06.67% en masse, marque la limite extrême à laquelle les alliages Fer-carbone sont utilisables. D'ailleurs, la majorité de ces alliages ne peuvent contenir plus de 05% en masse, car au-delà de cette valeur le matériau devient trop fragile (Résilience $K = 0 \text{ j / cm}^2$) pour être utilisé.

Ainsi, lorsque le pourcentage de carbone, dépasse 0.25% en masse, il devient nécessaire de prendre des précautions particulières dans le procédé de soudage, car les structures trempées de l'acier sont très sensibles à la fissuration et à la rupture fragile. Dans ce cas, l'amélioration de certaines propriétés de l'acier nécessite l'ajout de faibles proportions d'éléments tel Mn, Cr, Si, Ni, Zr, ...

L'effet durcissant du carbone dans l'acier étant capital ; il s'avère donc nécessaire d'évaluer la quantité de cet élément dans toutes les nuances utilisées ; sachant que pour notre étude nous avons choisi de caractériser quatre types d'aciers :

- 03 types utilisés dans l'ensemble soudé comme métaux de base du joint (Q36, TQ46 et NAXTRA).

- 01 type (nuance) utilisé comme cordon de soudure (SG3).

Pour chaque nuance, l'analyse du carbone a été faite par carbométrie

III.1.2 : Description de l'appareil d'absorption du carbone (carbomètre)

Le carbomètre est un appareil d'absorption de C, destiné à mesurer avec précision la teneur réelle en C ; contenue dans l'acier.

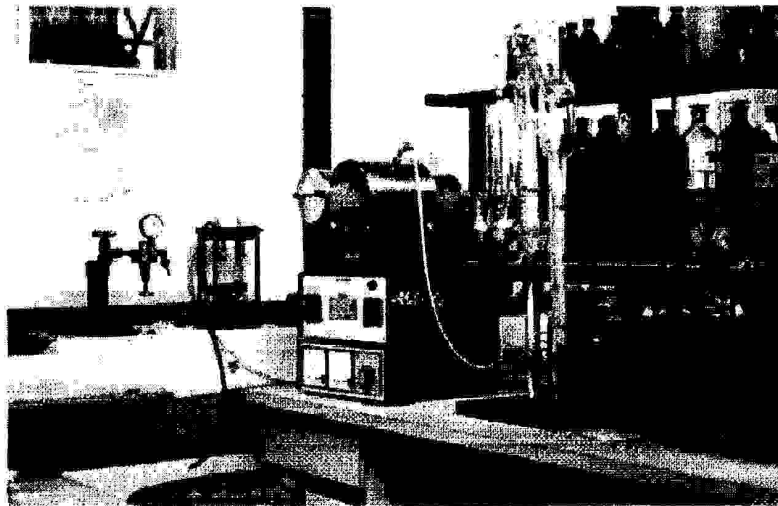


Fig. 3-1 : Montage du carbomètre

III.1.3 : Dosage du carbone

Nous avons utilisé le modèle amélioré avec deux vases d'absorption fig.(3-2). Dans ce cas ; Il n'est pas nécessaire d'introduire les gaz deux fois dans la burette (dans le cas du modèle normal ; l'introduction des gaz à deux reprises est nécessaire pour garantir une complète absorption du dioxyde de carbone Fig.(3-3)).

Pour l'adaptation de la gamme de mesure à la teneur en carbone de nos nuances (échantillons), les montages expérimentaux utilisés sont équipés des burettes suivantes :

Portée de mesure	Précision de lecture
De 0 à 0.25%	0.001
De 0 à 0.50%	0.002
De 0 à 1.50%	0.005
De 0 à 4.50%	0.010

Les valeurs lues sont corrigées à l'aide d'un tableau (tableau III-1) qui permet de faire correspondre, aux mesures effectuées, l'effet de la température et de la pression régnantes dans la salle de mesure.

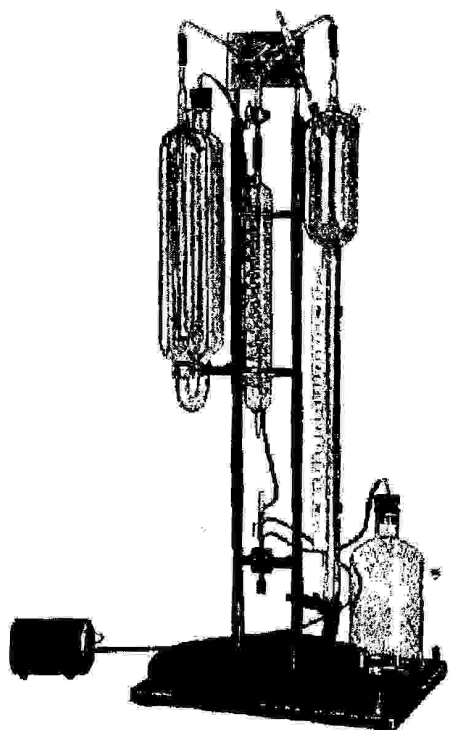


Fig. 3-2. modèle de carbomètre amélioré.

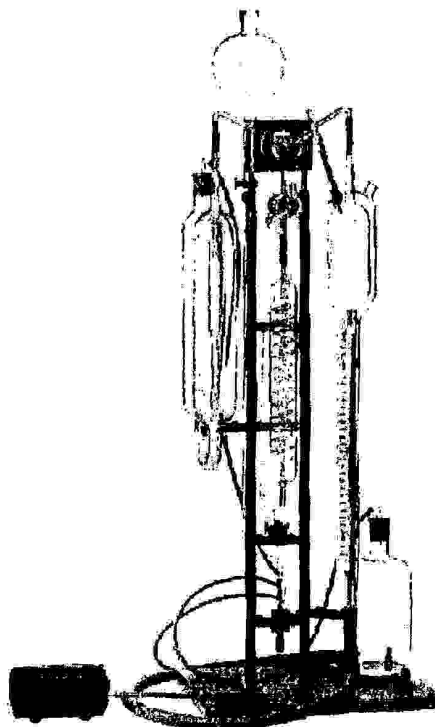


Fig. 3-3. modèle de carbomètre normal.

III .1 .4. Echelle Cylindrique d'après Bourg

L'emploi de l'échelle de bourg rend inutile la correction des valeurs par un tableau dépendant de la pression atmosphérique et de la température.

Elle se compose simplement d'un cylindre en Plexiglass avec une échelle graduée. A l'extrémité supérieure se trouvent deux bagues réglables avec une échelle pour la pression atmosphérique et pour la température fig.(3-4).

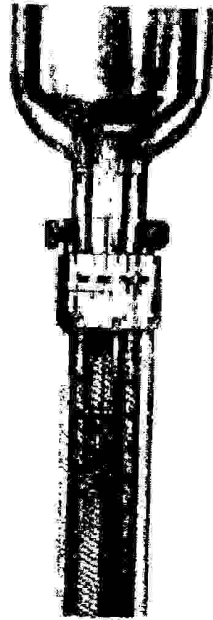


Fig. 3-4. Echelle cylindrique de Bourg.

Les valeurs en carbone lues à l'échelle graduée sont corrigées directement par rotation des deux bagues.

Tableau III-1 : Tableau donnant les valeurs de facteur de correction F :

T P	18°C	19°C	20°C	21°C	22°C	23°C	24°C	25°C	26°C	27°C	28°C
700	0.9112	0.9066	0.9022	0.8978 9	0.8932	0.8886	0.8808	0.8790	0.8742	0.8694	0.8644
701	0.9125	0.9079	0.9035	0.8991	0.8949	0.8899	0.8851	0.8803	0.8755	0.8707	0.8657
702	0.9138	0.9093	0.9048	0.9004	0.8958	0.8912	0.8864	0.8816	0.8768	0.8720	0.8670
703	0.9151	0.9106	0.9061	0.9017	0.8921	0.8925	0.8872	0.8829	0.8781	0.8733	0.8683
704	0.9169	0.9120	0.9048	0.9030	0.8984	0.8983	0.8890	0.8842	0.8794	0.8745	0.8696
705	0.9178	0.9133	0.9087	0.9043	0.8997	0.8951	0.8903	0.8855	0.8807	0.8758	0.8709
706	0.9191	0.9146	0.9101	0.9056	0.9010	0.8964	0.8516	0.8868	0.8820	0.8771	0.8720
707	0.9204	0.9159	0.9116	0.9069	0.9023	0.8577	0.8929	0.8881	0.8833	0.8784	0.8735
708	0.9218	0.8173	0.9127	0.9082	0.9036	0.8900	0.8342	0.8884	0.8846	0.8796	0.8740
709	0.9231	0.9186	0.9140	0.9095	0.9049	0.9003	0.9955	0.8907	0.8859	0.8809	0.8761
710	0.9244	0.9200	0.9154	0.9108	0.9062	0.9016	0.8968	0.8920	0.8872	0.8822	0.8774
711	0.9257	0.9213	0.9167	0.9121	0.9075	0.9029	0.8981	0.8933	0.8886	0.8835	0.8787
712	0.9271	0.9226	0.9180	0.9134	0.9088	0.9042	0.8994	0.8946	0.8858	0.8848	0.8800
713	0.9284	0.9239	0.9193	0.9147	0.9101	0.9055	0.9007	0.8559	0.8911	0.8860	0.8813
714	0.9298	0.9853	0.9207	0.9161	0.9114	0.9068	0.9020	0.8972	0.8924	0.8874	0.8825
715	0.9311	0.9266	0.9220	0.9174	0.9127	0.9081	0.9033	0.8985	0.8932	0.8887	0.8838
716	0.9324	0.9279	0.8233	0.9187	0.9140	0.9094	0.9046	0.8998	0.8950	0.9900	0.8851
717	0.9387	0.9272	0.9246	0.9200	0.9153	0.9107	0.9059	0.9011	0.8963	0.8913	0.8894
718	0.9351	0.9306	0.9260	0.9214	0.9166	0.9120	0.9072	0.9024	0.8976	0.8926	0.8876
719	0.9364	0.9319	0.9273	0.9227	0.9180	0.9133	0.9085	0.9037	0.8985	0.8939	0.8889
720	0.9378	0.9332	0.9286	0.9240	0.9196	0.9146	0.9098	0.9050	0.9002	0.8952	0.8502
721	0.9391	0.9345	0.9289	0.9253	0.9207	0.9181	0.9111	0.9163	0.9015	0.8965	0.8815
722	0.9404	0.9358	0.9312	0.9266	0.9220	0.9172	0.9124	0.9076	0.9028	0.8978	0.8928
723	0.9417	0.9371	0.9325	0.9279	0.9233	0.9185	0.9137	0.9089	0.9041	0.8991	0.8941
724	0.9431	0.9385	0.9339	0.9253	0.9246	0.9199	0.9151	0.9102	0.9054	0.9004	0.8953
725	0.9444	0.9398	0.9352	0.9306	0.9259	0.9212	0.9164	0.9115	0.9067	0.9017	0.8966
726	0.9457	0.9411	0.9365	0.9319	0.9272	0.9225	0.9177	0.9128	0.9080	0.9030	0.8979
727	0.9470	0.9424	0.9378	0.9332	0.9285	0.9238	0.9190	0.9141	0.9093	0.9043	0.8992
728	0.9484	0.9438	0.9392	0.9346	0.9298	0.9252	0.9204	0.9154	0.9106	0.9056	0.9004
729	0.9497	0.9451	0.9405	0.9359	0.9311	0.9265	0.9217	0.9167	0.9119	0.9069	0.9017
730	0.9510	0.9464	0.9415	0.9372	0.9324	0.9278	0.9230	0.9180	0.9312	0.9082	0.9030

1 torr = 133.32 Pa = 1.333.10⁻³ Bar = 1mm Hg à (0°C).

T : température [C°]

P : pression atmosphérique [Torr]

La pression atmosphérique indiquée sur le baromètre au sien du laboratoire d'essai :

1 à 12°C(-1)

13 à 20°C(-2)

21 à 29°C(-3)

30 à 35°C(-4)

III.1.5 : Déroulement de l'analyse carbométriques (procédé) :

L'analyse est effectuée suivant les séquences citées ci – dessous :

- 1- Placement des copeaux des nuances aux analyses dans un four à tube, dont la chambre de combustion est en céramique, copeaux préalablement pesés ;
- 2- Passage d'un courant d'oxygène, pour brûler les nuances et ce afin de former le dioxyde de carbone (température dans le four 1250°C), oxygène soigneusement séché et purifié dans deux flacons laveurs ; l'un contient de l'acide sulfurique H₂SO₄ à 96% et l'autre contenant de la potasse KOH à 50% ;
- 3- Gaz de combustion ainsi que l'oxygène en excès recueillis et mesurés dans une burette à gaz, sur laquelle est fixée une réglette graduée (de 0 à 4.5).

Ainsi après avoir atteint le zéro de l'échelle graduée, le gaz est refoulé à 2 – deux reprises dans une lessive d'absorption remplie de potasse en solution. Le dioxyde de carbone est ainsi absorbé, de reste du gaz est ramené dans la burette. Sur l'échelle graduée en %, on relève la diminution par rapport au volume initial, ce qui permet de déterminer la teneur réelle en carbone, de l'échantillon analysé.

Le titre réel contenu dans la nuance est obtenu suivant la relation :

$$\% \text{ carbone} = F \times V$$

Où :

F: Le facteur de correction qui tient compte des conditions de l'essai (pression atmosphérique P en unité-torr ainsi que la température T en °C ;

V : La valeur lue sur la colonne et qui représente la différence $V_2 - V_1$ sur la réglette graduée ;

Remarque

Avant de procéder à la manipulation directe, l'étalonnage de l'appareil est nécessaire.

On fait un essai sur cette dernière en utilisant un **échantillon-Etalon** dont la teneur en carbone est de : 1.21 %.

A titre d'exemple : après cet essai, le %C = 1.20% montre que ce dernier est calibré à 0.01 prés. Donc on ajoute 0.01 aux résultats obtenus et en aura :

$$\%C = F \times V + \text{Facteur correctif de la précision de l'appareil.}$$

Les conditions communes pour toutes nos expériences sont fixées par :

P = 721 Torr et T = 19 °C (F = 0.9319).

La masse de la prise d'essai est égale toujours à 1 gramme.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Nuance	Valeur indiquée sur la burette (V)	Facteur de correction (F)	Pourcentage du carbone (%C)	%C normes	Métal
Q36	0.17 0.18	0.9319 0.9319	0.1684 0.1777	Max 0.18	MB**
TQ46	0.19 0.18	0.9319	0.1870 0.1777	Max 0.21	MB**
Naxtra 60	0.16 0.15	0.9319	0.1591 0.1497	Max 0.20	MB**
SG ₃	0.10 0.11	0.9319	0.1031 0.1125	0.07-0.14	MA***

**MB : métal de base.

***MA : métal d'apport.

Tableau III-2. Résultats des analyses carbométriques

III.2.Spectrométrie [19]

III.2.1.Introduction

De nos jours, le contrôle des matériaux à utiliser lors de l'entrée en magasin et avant transformation s'avère souvent nécessaire.

A coté des autres méthodes chimiques et mécaniques classique, l'analyse spectrale prend un intérêt très important.

En effet, en peu de temps, cette analyse peut livre plusieurs informations fiables concernant la composition des échantillons en déterminant avec précision les concentrations importantes en éléments d'alliage.

III.2.2.Principe de l'analyse spectrale

Nous savons que chaque élément chimique lorsqu'il subit une excitation émet un rayonnement spécifique d'une couleur ou d'une longueur d'onde bien déterminée.

De cette manière, une fois émis, le faisceau lumineux passe par un prisme qui le repartit suivant ses composantes, ce qui permet de caractériser et faire apparaître sous forme de raies spectrales de différentes couleurs des raies émises de l'alliage à analyser.

L'intensité lumineuse des raies spectrales correspond à la teneur de l'élément considéré dans l'échantillon objet d'analyse.

III.2.3.Principe de fonctionnement d'un spectravist

Dans un spectravist, la reconnaissance des raies de spectres complexes ; riche en raies, ne présente pas de difficulté, la sensibilité est d'une puissance de 10, par rapport à un spectroscope à métaux ordinaire, on peut faire des analyses sur des minéraux, des minerais et des liquides ...

Il est possible d'étendre l'analyse jusqu'à 3900 Å et ce proche des rayonnement U.V. La fig. (3-5) représente une vue d'ensemble d'un spectravist 88 d avec ses composantes les plus utilisées.

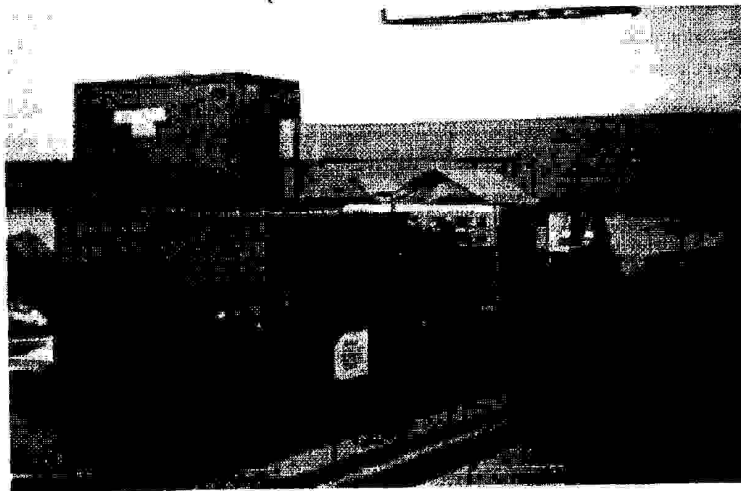


Fig. 3-5. Spectravist 88 d.

Un arc d'excitation à courant alternatif initié entre l'échantillon pose sur la table d'analyse et la contre-électrode (électrode disque en métal pur) lors de la décharge la lumière émise caractérise la composition de l'échantillon et elle est utilisée d'une manière complexe au cours de l'examen (voir Fig. 3-6).

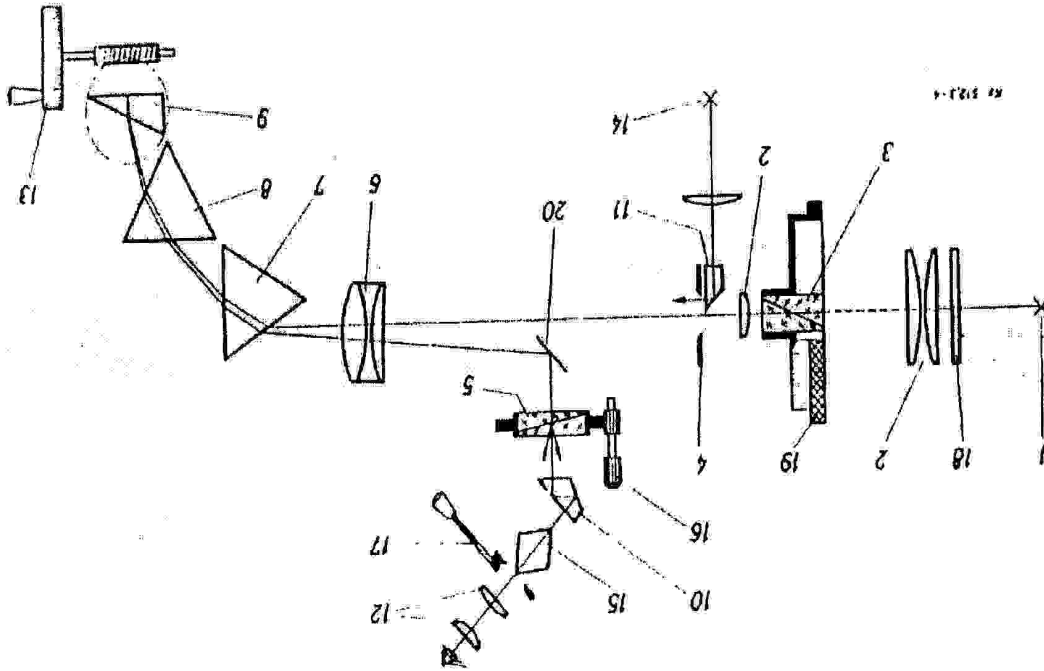


Fig. 3-6. Appareil spectravist-schéma optique

-N° 1,2,3,.....20 Légendes du schéma optique du spectravist

- 1- Echantillon
- 2- Lentilles d'élimination
- 3- Prisme de polarisation relatif pour la mesure des concentrations
- 4- Fente spectroscopique
- 5- Prisme de Wolaston
- 6- Objectif
- 7, 8, 9- Prisme de dispersion
- 10, 11- Prisme de déviation
- 12- Oculaire
- 13- Tambour pour réglage des longueurs d'onde
- 14- Echantillon auxiliaire
- 15- Prisme rhomboïdal de Huefner
- 16- Bouton de réglage pour le déplacement relatif de spectres partiels I et II
- 17- Diaphragme de champ visuel
- 18- Filtre gris
- 19- Tambour de mesure avec échelle de concentration

20-Miroir de déviation

Pour suite du double passage de la lumière par 2 $\frac{1}{2}$ prismes, On obtient la dispersion effective équivalent à 5 prismes et de ce fait le pouvoir de résolution correspondant.

Par rotation de la manivelle 13, le spectre se déplace dans l'oculaire 12 sous l'œil de l'observation.

Le réglage d'une gamme de Longueur d'onde désirée est obtenu grâce au tombeur de longueur d'onde 13. Dans ce stade ; on peut marquer certains éléments correspondent à des raies d'analyse rencontrées fréquemment dans des matériaux analysés telles que le chrome (Cr).

Le manganèse (Mn) et le titane (Ti) sur la table auxiliaire, on peut placer un échantillon auxiliaire 14 qui constituer une aide remarquable dans le processus d'analyse. Généralement on utilise l'élément pur du métal de base de l'alliage comme échantillon auxiliaire.

Le rayonnement de l'échantillon auxiliaire entre dans le spectroscopie à travers un prisme de réflexion 11 de manière que les spectres d'analyses I, II et le spectre auxiliaire III apparaissent simultanément dans le champ visuel, adjacents l'un à l'autre. Alors que les raies communes de l'élément de base existent dans tous les trois spectres et en sens verticale. Les raies des éléments à doses n'apparaissent que dans les deux spectres I et II en haut. Pour l'analyse qualitative, qui est la détermination des constituants de l'échantillon, des instructions détaillées de travail avec figures de spectres sont fournies avec l'appareil. Pour l'analyse quantitative ; le rapport d'intensité entre une raie d'analyse A et une raie de référence B est déterminé par mesure photométrique. Si l'on fait tourner le prisme 5 à l'aide du bouton de réglage 16, les deux spectres I et II de l'échantillon se déplacent l'un vers l'autre.

On tourne le bouton jusqu'à ce que les raies A et B se trouvent exactement en ligne (Fig.3-7). Quant les raies d'analyse et de références sont disposées avec précision, l'un au dessus de l'autre et sont séparées par une ligne très fine.

Pour exécuter la mesure, il suffit de tourner le prisme de polarisation 3 à l'aide du tambour de mesure 19 jusqu'à ce que les raies apparaissent dans la même luminosité. La position angulaire du prisme de polarisation est lue directement sur l'échelle du tambour avec cet angle on obtient la concentration (V%) de l'élément à doser et cela à l'aide d'une courbe spéciale de calibration fournie avec l'appareil (voir Fig.3-8).

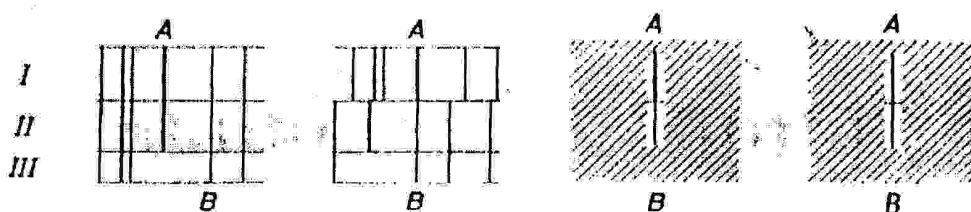


Fig. 3-7. Schéma du procédé de la photométrie

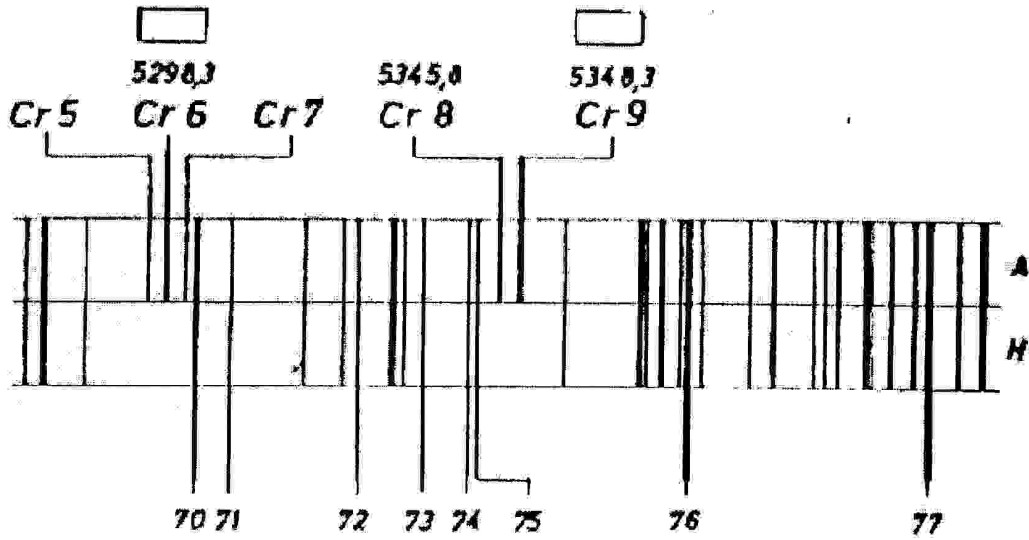


Fig. 3-8. Partie du spectre d'un Acier-Cr

Une note finalement que chaque mesure est entachée d'une erreur. L'analyse moyenne du spectravist est d'environ $\pm 3 \dots 10\%$ pour l'examination de l'Acier ; $\pm 10 \dots 15\%$ pour la fonte et environ $\pm 15 \dots 20\%$ pour les Alliages d'aluminium.

III.2.4.Mode Opérateur

III.2.4.1.Préparation des échantillons

De chaque éprouvette soudée, nous avons prélevé un échantillon de 8 cm de longueur à l'aide d'une coupe transversale (à froid) Fig. 3-9.

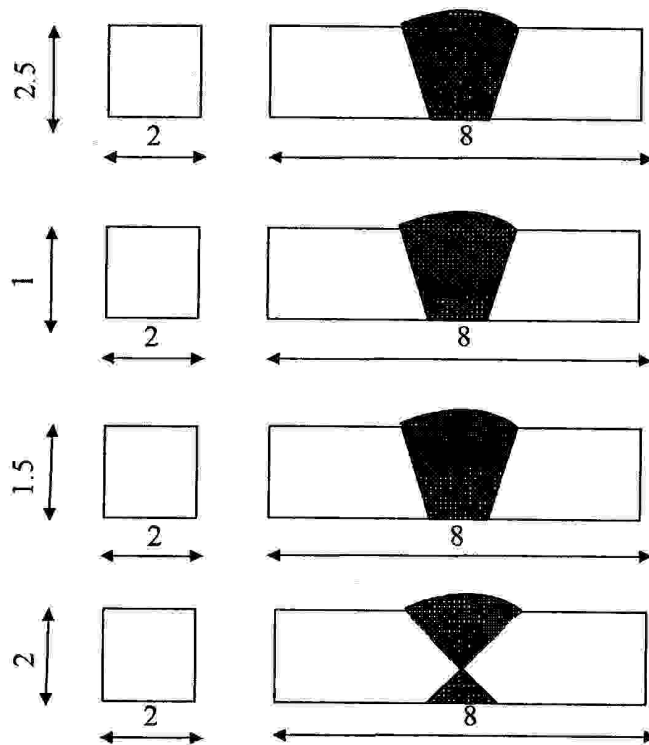


Fig.3.9- Dimensions des éprouvettes utilisées dans l'analyse spectrale

III.2.4.2.Polissage

C'est l'opération préliminaire nécessaire avant le procédé d'analyse spectrale des échantillons (x_1 , x_2 , x_3 , et x_4). Ce dernier est le dégrossissage et l'élimination des couches superficielles irrégulières, rayures et déformations dues aux Opérations précédentes et l'obtention d'un état de surface en miroir.

III.2.5.Déroulement de l'essai

Dans ce cas, l'expérience est rapportée sur 4 échantillons où le métal de base et le métal d'apport sont inconnus et chaque fois on refait 2 essais (question de vérification). On utilise pour la détermination de tous les éléments une Contre-électrode en Fer par (Fe) sous forme de disque. La distance de l'électrode est toujours réglée à 2mm. Le temps de pré-étincelage sur nos échantillons de 8cm de longueurs, 2cm de largeurs et différents diamètres (1, 1.5, 2, 2.5) cm respectivement est fixé toujours à 20 secondes.

Remarque 1

Pour des analyses précises et exemptes de fautes, une condition primaire doit être prise en considération qui est le pré-étincelage car pour certaines analyses, les résultats ne peuvent avoir lieu qui après un temps important de pré-étincelage et surtout dans le cas des composantes facilement volatiles. Si par exemple, on commence avec une analyse de manganèse (Mn).

Les conditions suivantes doivent être respectées:

- 1-Temps de chauffage de l'appareil > 1minute.
- 2-Allumation d'Arc et repération des lignes d'analyse.
- 3-Allumation d'étincelle et préchauffements de l'excitateur.

Et la Contre-électrode avec un échantillon quelconque pendant au moins 10 minutes et à 5.8 Ampères, Après ces précautions, l'analyse des autres éléments (Si, Cr, ...) ne demande que quelques minutes (le temps d'échange, d'électrode). La table d'éprouvettes sur laquelle on fait étinceler du Fer forme une aide précieuse.

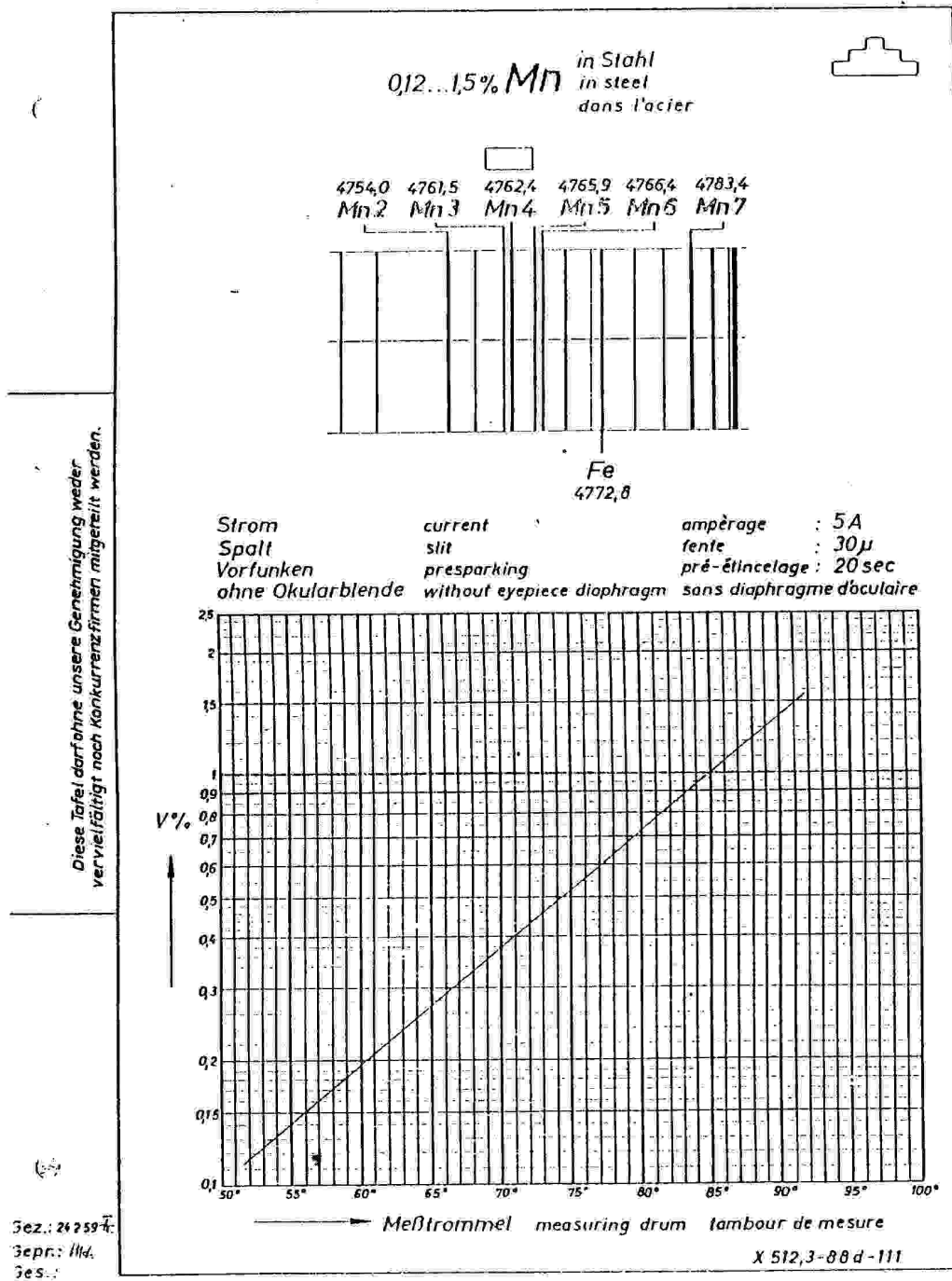
On procède nos Analyses selon les tables :

- X 512.3-88d-111 où la concentration du manganèse est incluse dans l'intervalle 0.12 à 1.5 %.
- X512.3-88d-112 où la concentration du manganèse appartient à l'intervalle 1 à 4 %.
- X512.3-88d-107 pour l'identification du chrome (Cr) dans l'intervalle 0.65 à 6.5 %.
- X512.3-88d-208 pour l'identification du silicium (Si) dans l'intervalle 1.2 à 4 %.

Les chiffres encadrés au-dessus de la ligne montrent la valeur affichée au tambour de longueur d'onde.

Remarque 2

Concernant les autres éléments (P, S, Ti, Ni,), l'appareil de spectravist n'est pas accessible de les marquer et par conséquent d'identifier leurs existences, cela peut être dû à l'épuisement et la vieillesse de l'appareil. Fig.3-10.



Diese Tafel darf ohne unsere Genehmigung weder vervielfältigt noch Konkurrenzfirmen mitgeteilt werden.

Sez.: 24259
3epn: Hh.
3es.:

Fig. 3.10. a-

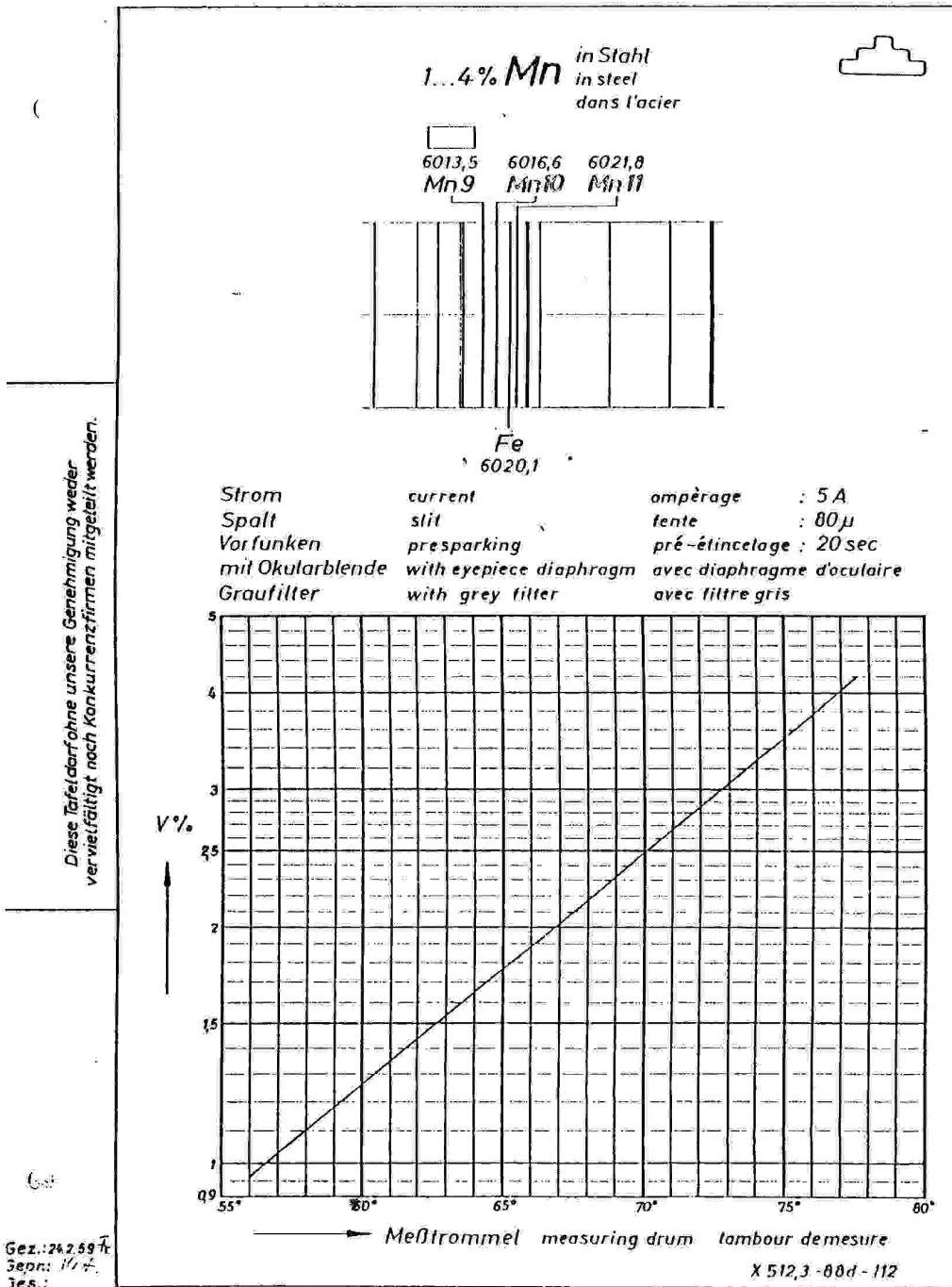


Fig. 3.10.b-

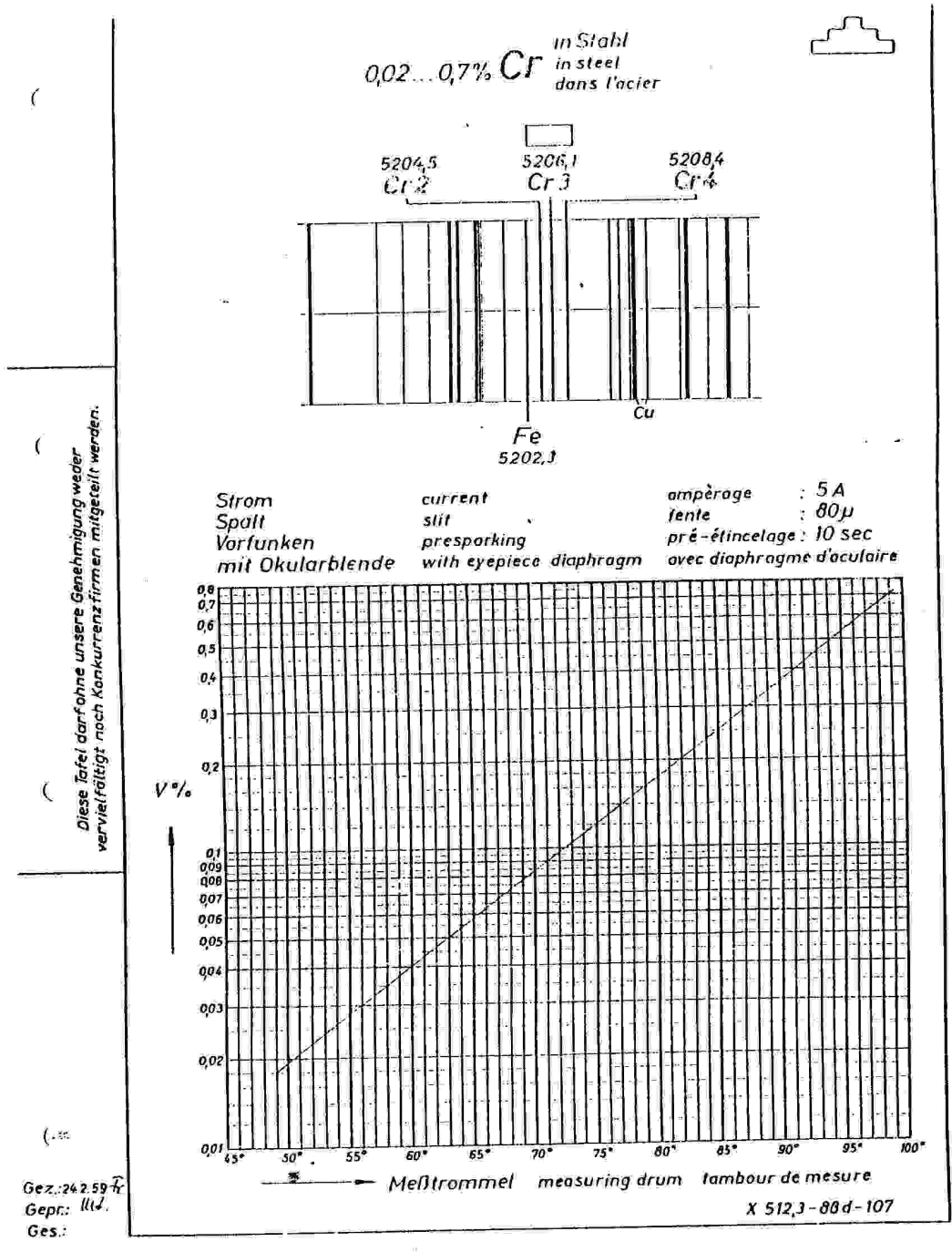


Fig. 3.10. c-

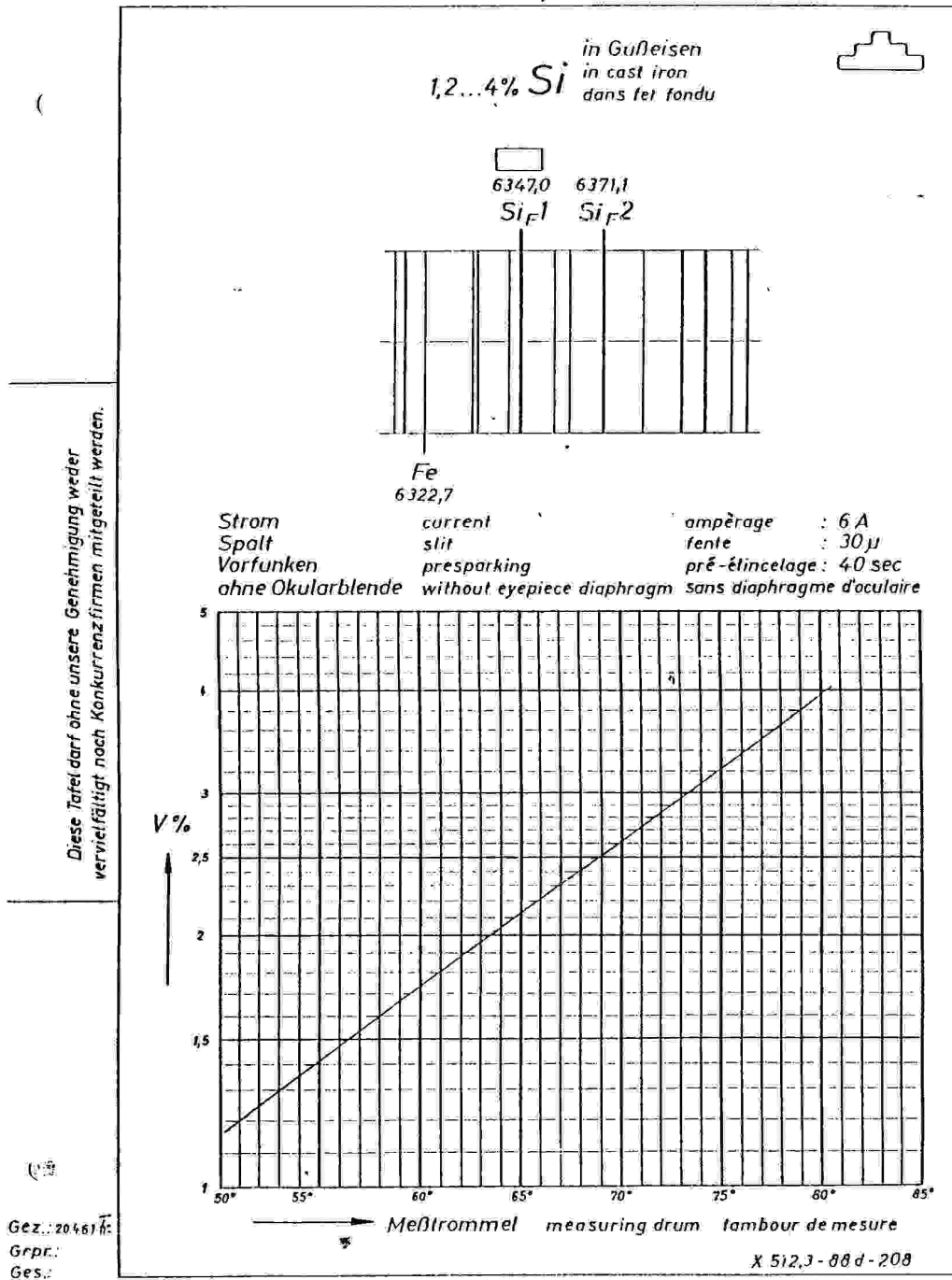


Fig. 3.10.d-

III.2.6.Résultats et discussion

D'après les résultats des analyses carbométriques et spectrales et par comparaison avec les données selon les normes on a pu conclure que

1)- Pour le métal de base

les valeurs des éléments d'alliages pour le (Mn), (Si) et (Cr) ont montrés que le métal de base est $\phi 36$ ou $\tau\phi 46$ mais on ne peut pas juger et différencier l'un de l'autre car la plupart de ces valeurs sont presque identiques. Pour éliminer cette ambiguïté on fait étinceler chaque échantillons (x_1 , x_2 , et x_3) sur la table d'analyse et un autre échantillon de composition déjà connue ($\phi 36$ ou $\tau\phi 46$) sur la table auxiliaire.

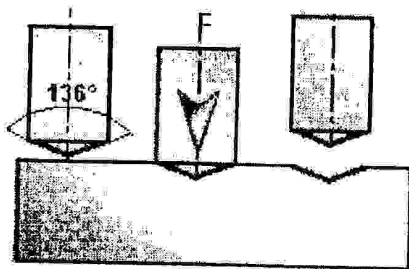
Si les deux échantillons ont la même composition, la ligne d'analyse apparaît dans les deux spectres avec la même intensité. Ce procédé simple permet de faire une comparaison rapide entre la composition d'échantillon de base et de référence à condition que les deux spectres soient clairs. De cette manière là, on a pu identifier nos échantillons soit $\phi 36$ ou $\tau\phi 46$ à coté de (Mn) et (Si) le taux de chrome (Cr) dans l'acier qui est 0.7 montre que l'échantillon x_4 n'est que le matériaux Naxtra 60.

2)-Pour le métal d'apport

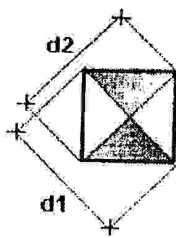
Les deux valeurs des éléments d'alliages collectées, soit pour (Mn) (1.6%) ou pour (Si) (1%) montrent que notre métal d'apport est le (SG3).

Nuance	Eléments d'alliages	%	Norme %	Nature
Q 36	Manganèse (Mn) Silicium (Si) Chrome (Cr)	1.5-1.5 0.45-0.5 -	Environ 1.60 Max 0.50 -	MB**
TQ 46	Manganèse (Mn) Silicium (Si) Chrome (Cr)	1.65-1.68 0.45-0.45 -	Max 1.70 Max 0.50	MB**
NAXT-RA 60	Manganèse (Mn) Silicium (Si) Chrome (Cr)	0.70-0.70 0.6-0.7 * 0.7-0.7	(0.6-1.0) (0.4-0.8) (0.5-0.9)	MB**
SG 3	Manganèse (Mn) Silicium (Si) Chrome (Cr)	1.7-1.6 1-1.1 -	(1.6-1.9) (0.8-1.2) -	MA***

Tableau III-3 Résultats d'analyses spectrométrique



$$HV = 0,189 \times \frac{F}{d \times d}$$



$$d = \frac{d1 + d2}{2}$$

Essai Vickers - HV

Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° sous une charge F. On mesure les diagonales "d" de l'empreinte.

III.3. Microdureté[19]

III.3.1. Définition

« la dureté d'un métal est son aptitude à résister à la pénétration »

La mesure de cette grandeur est très importante car elle nous permet de déterminer le comportement physico-chimique et mécanique d'un alliage.

Il faut préciser qu'en grand partie, c'est le taux de carbone dans l'acier, qui gère ce comportement, on dira Alors que :

si % c < 0,40 l'acier est dur
 0,60 < % c < 0,70 l'acier est très dur
 % c > 0,70 l'acier est extra-dur

La dureté vickers (Hv) est souvent mesurée en couches superficielles des échantillons avec des charges appliquées faibles et par conséquent les empreintes obtenues microscopiques.

Les duretés des couches superficielles peuvent différer des duretés (Hv) à cœur, c'est pourquoi des duretés mesurées (Hv) ne coïncident pas avec celles qui sont mesurées sous fortes charges.

Il sera donc très utile d'indiquer sous qu'elle charge, la dureté (Hv) a été mesurée.

En réalité, pour obtenir des empreintes mesurables, il est inévitable de polir la surface de l'échantillon.

Dans notre étude, nous allons évaluer cette caractéristique qualitative mais très estimative de façon simplifiée d'un métal de base. Une zone affectée par la chaleur et une zone fondue.

III.3.2. Essai de micro dureté

III.3.2.1. Dureté vickers

On utilise pour un tel essai un diamant en forme pyramidale à base carrée. L'analyse au sommet entre les faces opposées est égale à 136°, la profondeur de pénétration est égale à $\frac{1}{7}$ de diagonale de l'empreinte.

$$\text{Dureté vickers } H_v (\text{kp/mm}^2) = 0,189 \frac{P}{d^2}$$

où :

P : charge appliquée (p).

d : moyenne des deux diagonales de l'empreinte (μm).

III.3.2.2 Mesure d'une empreinte de vickers

Lorsque le pénétrateur de duromètre descend et le diamant imprime son empreinte, comment faisons pour mesurer une telle empreinte ?

(voir fig. 3-11)

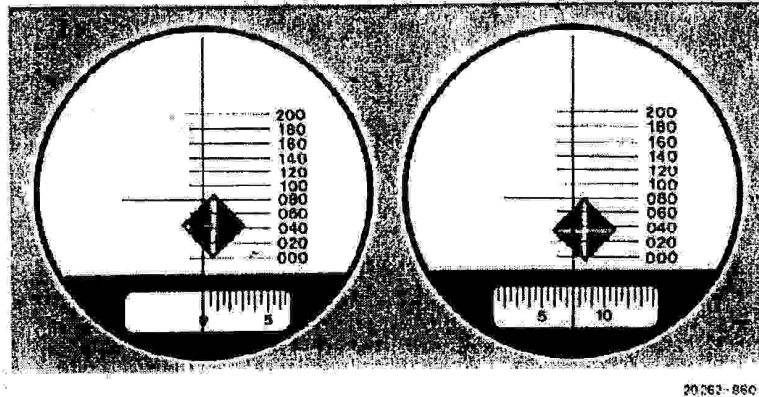


Fig. 3-11. mesure de l'empreinte de Vickers

- 1^{er} Réglage : à zéro.
 - 2^{ème} Réglage : rotation de la broche micro métrique de l'oculaire qui provoque le décalage de la graduation du réticule, et pour faire, on coïncide le 5^{ème} trait avec le point opposée de l'empreinte.
- 4 intervalles du réticule : $4 \times 20 \mu\text{m} = 80 \mu\text{m}$.
 Lecture de l'échelle inférieure $7,5 \mu\text{m}$
 Longueur de l'empreinte $87,5 \mu\text{m}$

VI.3.3 : Le microduromètre pour dureté vickers knoop et à la rayure (type : leitz durimet-2)

C'est une machine pour la mesure de dureté Vickers Knoop et à la rayure avec des charges de 5P ($\approx 0.05\text{N}$) à 2000 p ($\approx 20\text{N}$). Pour l'exploration de l'objet et la recherche des détails sur lesquels on veut effectuer les mesures ; on utilise une table de mesure $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$.

L'éclairage applique le principe de Kohler signifie que l'éclairage du champ-objet est optimal.

Le dispositif de pénétration est fixé à demeure sur le tube de microscope et monté sur un dispositif de rotation avec les objectifs 10x et 50x.

Le microduromètre à un dispositif de signaux permettant de suivre avec précision les opérations de l'essai :

- Le signal lumineux vert indique que l'appareil est prêt à fonctionner.
- Le signal rouge s'allume lorsque le pénétrateur descend et le Diamond imprime son empreinte pendant un temps de repos (30 seconds), le diamant applique sa pression de pénétration.
- Le signal lumineux jaune s'allume, cela indique que le pénétrateur peut être relevé.

Pour constituer une documentation sur les empreintes avec leurs mesures, l'appareil est équipé d'un dispositif photographique de mise au point de l'image avec une chambre de réflexion VISO flux à verre dépoli.

Une vue d'ensemble de l'appareil avec ces constituants les plus utilisées est représentées par la figure 3-12.

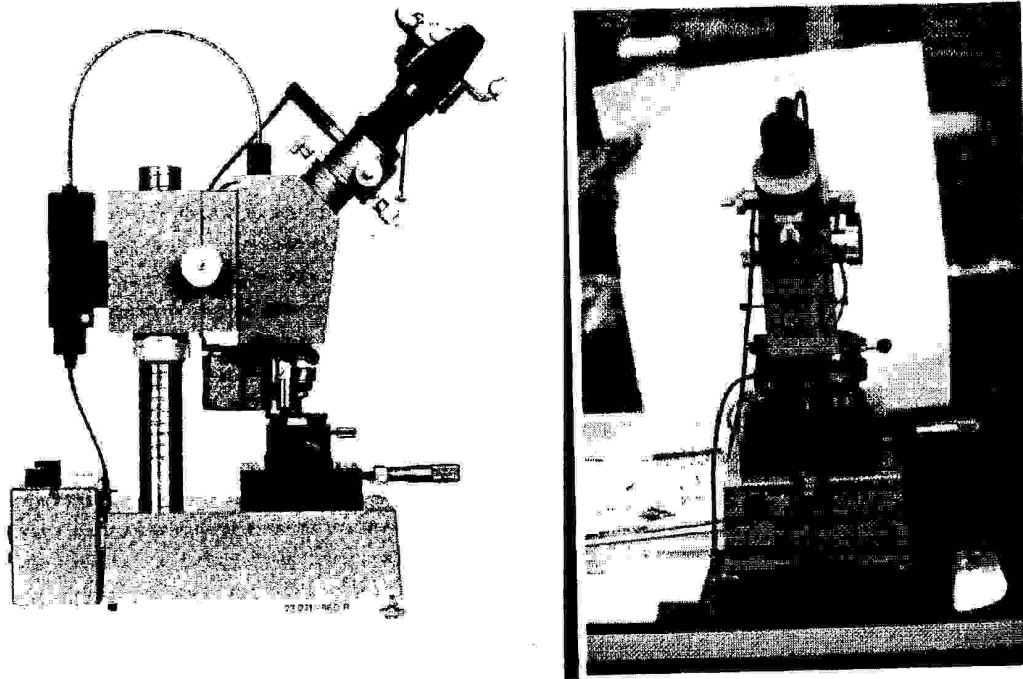


Fig. 3-12 : Microduromètre

III.3.4 : Mode opératoire

III.3.4.1. préparation des échantillons

De chaque type d'éprouvette, on prend un échantillon avec les mêmes dimensions que dans l'analyse spectrale, pour cela, on fait un découpage par une tronçonneuse à disque lubrifiée puis on les passent par une surfaceuse à bonde lubrifiée pour obtenir une surface plane et horizontale.

III.3.4.2. polissage

Maintenant la surface de l'échantillon est polie à l'aide de papier abrasif de granulométrie on peut commencer selon l'état de surface initiale par du papier de grains (80, 120, 280, 320....., 1200) et de terminer l'opération par feutre mouillé avec des grains du diamant mélangé avec l'alcool. A la fin, il faut obtenir un polissage d'un état de surface miroir de telle sorte que l'œil n'y distingue plus de raies.

III.3.4.3.L'attaque chimique

L'échantillon bien poli est immergé dans un réactif d'attaque on utilise pour cela le nital (Acide nitrique (HNO₃) de 4% et l'alcool de 94%) pendant une durée d'attaque de 30secondes. On réalise cette opération pour localiser les différentes zones de l'échantillon (MB, ZAT, ZF).

Enfin, on fait un bon nettoyage avec de l'eau distillée et on fait sécher par un séchoir pendant 20 seconds. Maintenant les 4 échantillons sont prêts à l'essai de dureté vickers.

III.3.5.Deroulement de l'essai

Maintenant les différentes zones des échantillons sont déterminées. Au court de cet essai, on fait un balayage total de la surface de l'échantillon de droite à gauche avec un pas de 0,5 et 1 mm comme il est représenté par la figure 3-13.

On applique une charge $F= 4,903 \text{ N}$ sur la surface de l'échantillon avec une vitesse constants jusqu'à ce qu'en voit un signal sur le microduromètre indiquant que l'essai est terminé (genres de lumps d'allumage vert rouge et jaune).

A l'aide des microscopes associés, on observe les traces sur la surface sous forme d'empreinte et on détermine la dureté Vickers selon la relation présente.

$$H_v = \frac{189.10^3 P}{d^2} ; R_m = 3.375 \times 0.95 H_v$$

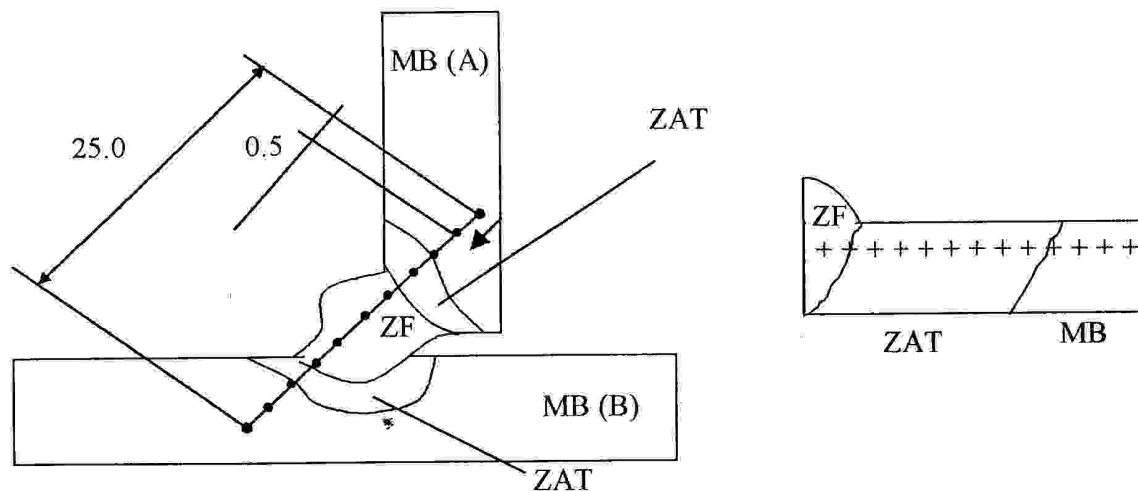


Fig. 3-13. Profile de la microdureté

Les résultats obtenus à partir de l'expérience (dureté et résistance) en considérant quatre échantillons sont présentés dans les figures ci-dessous :

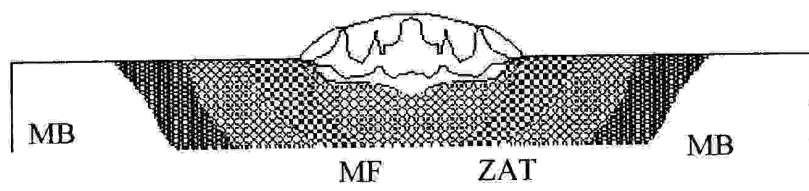
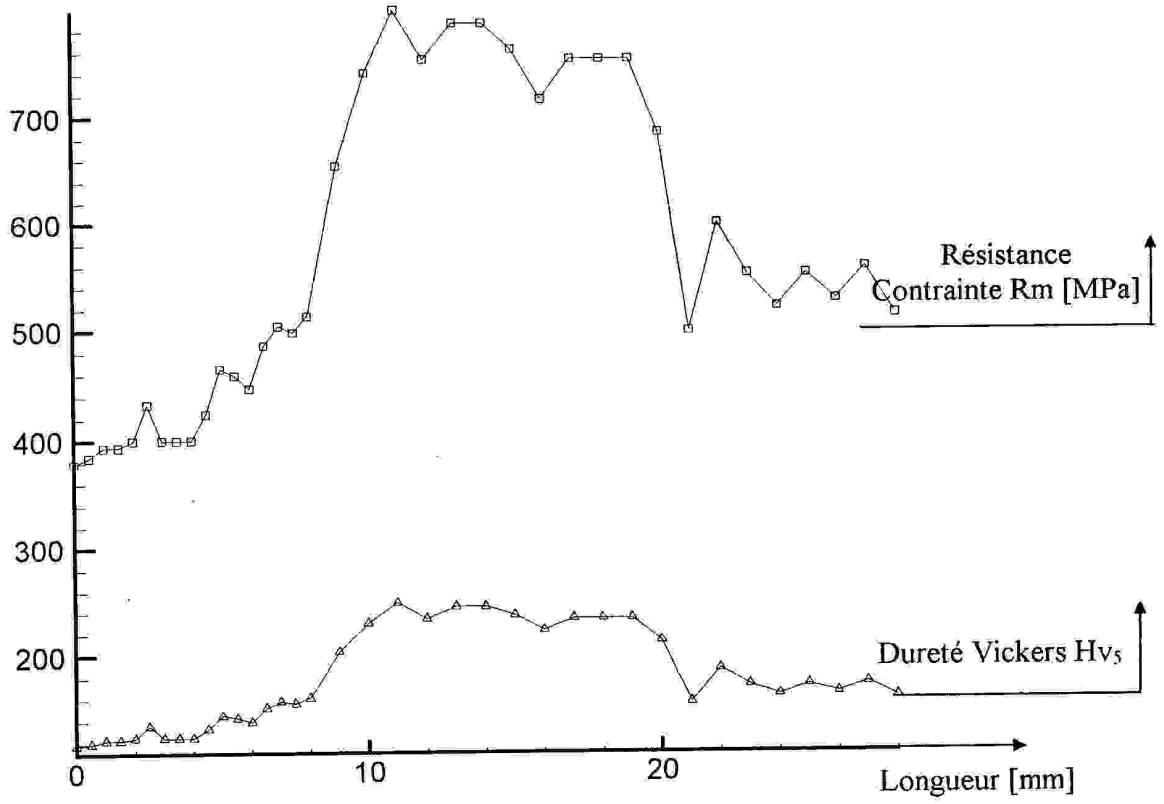


Fig. 3-14.
Cartographie de microdureté
Echantillon I Q36

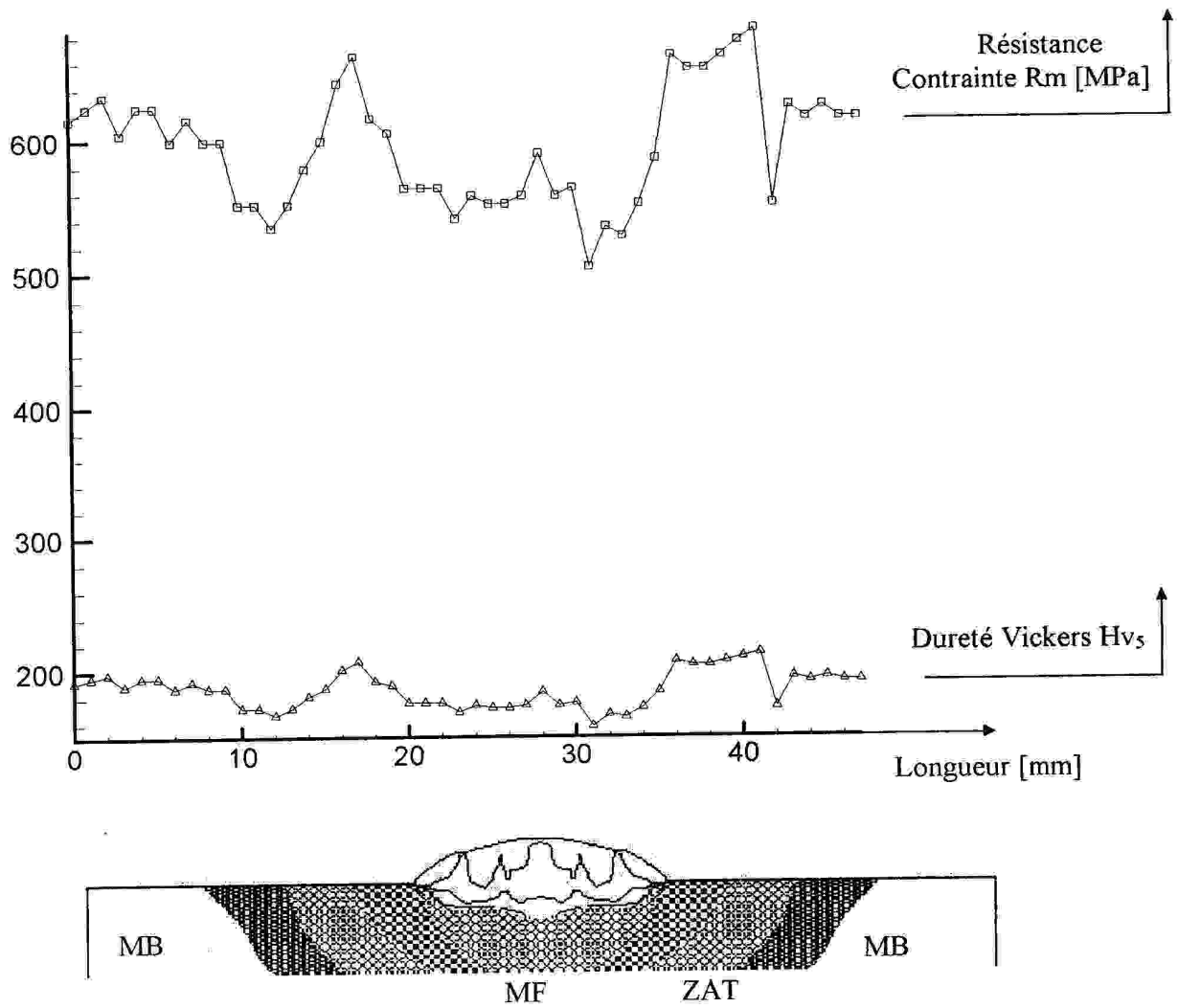


Fig. 3-15.
Cartographie de microdureté
Echantillon2 TQ46

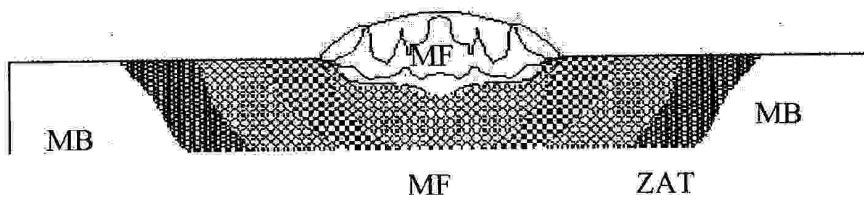
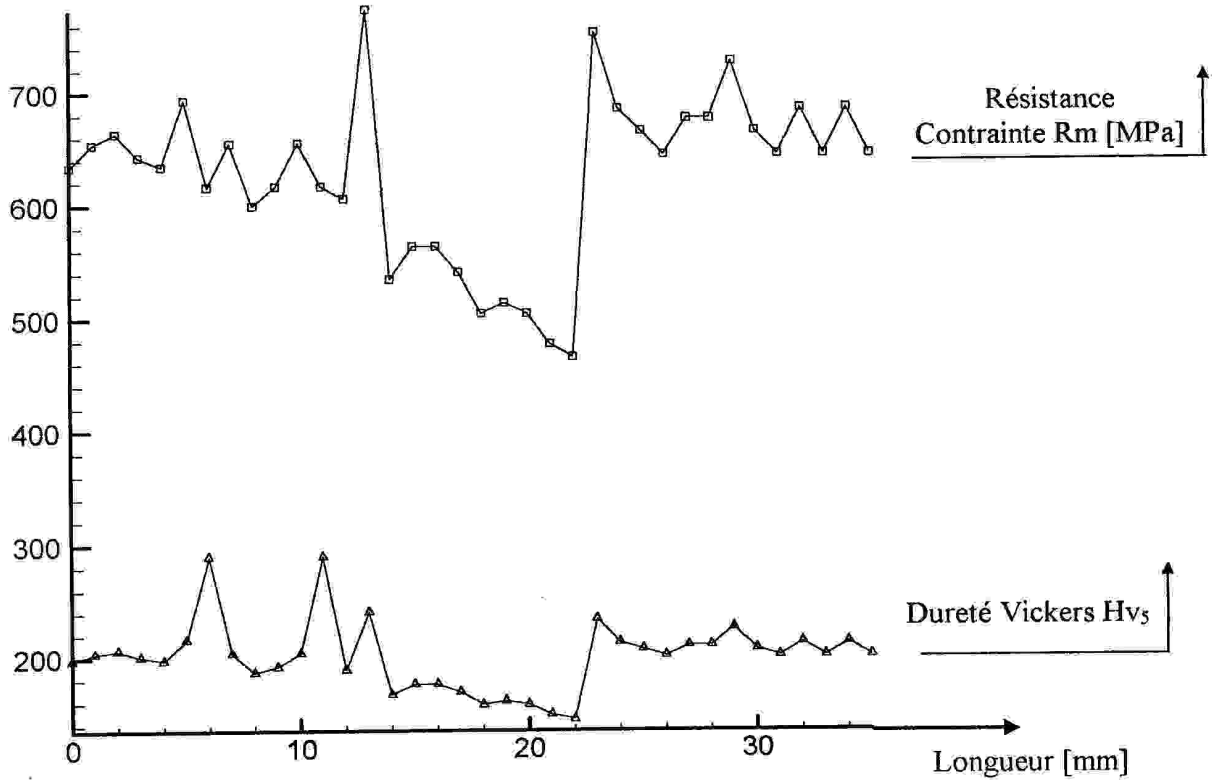


Fig. 3-16.
Cartographie de microdureté
Echantillon3 TQ46

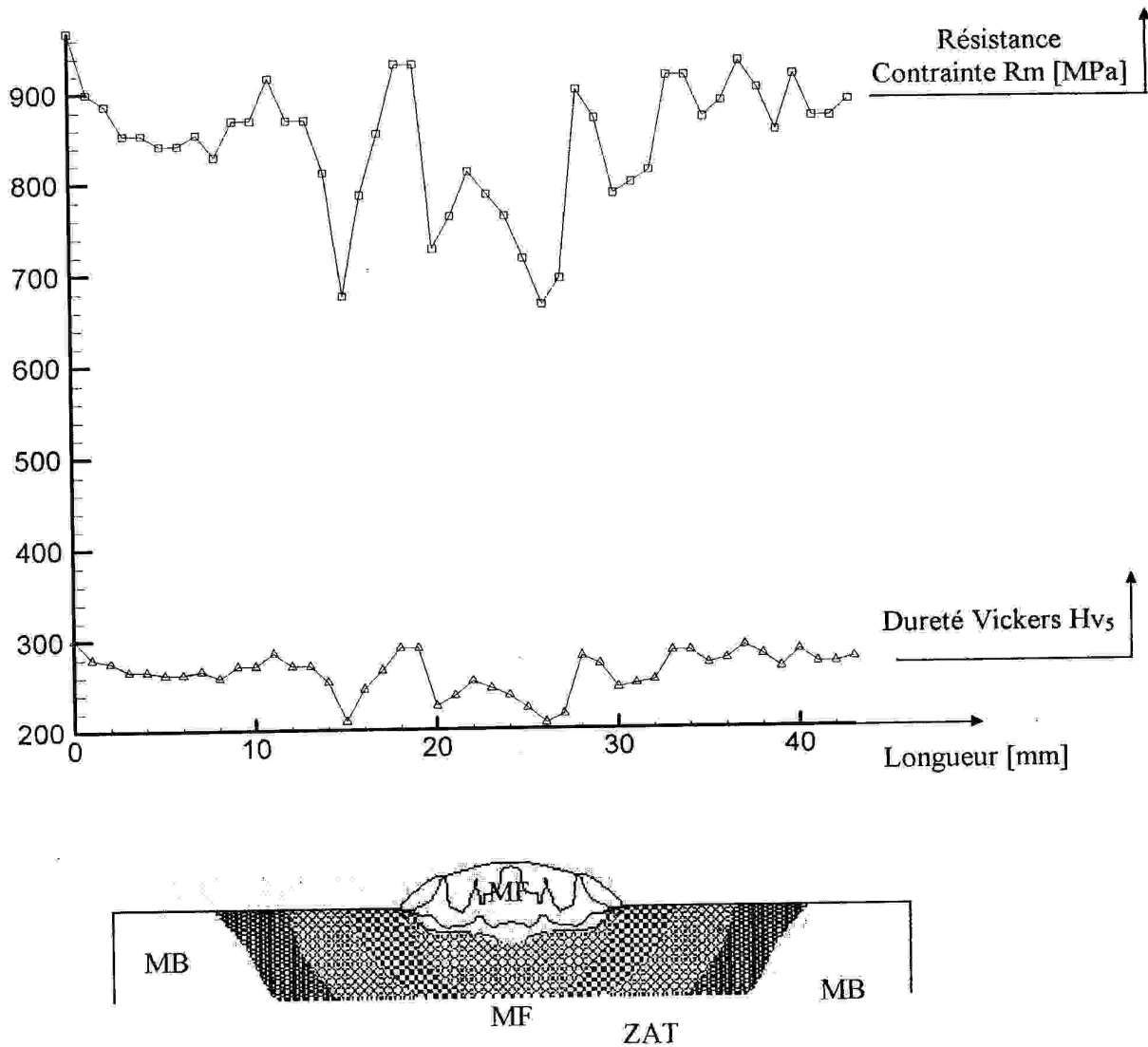


Fig. 3-17.
Cartographie de microdureté
Echantillon4 Naxtra

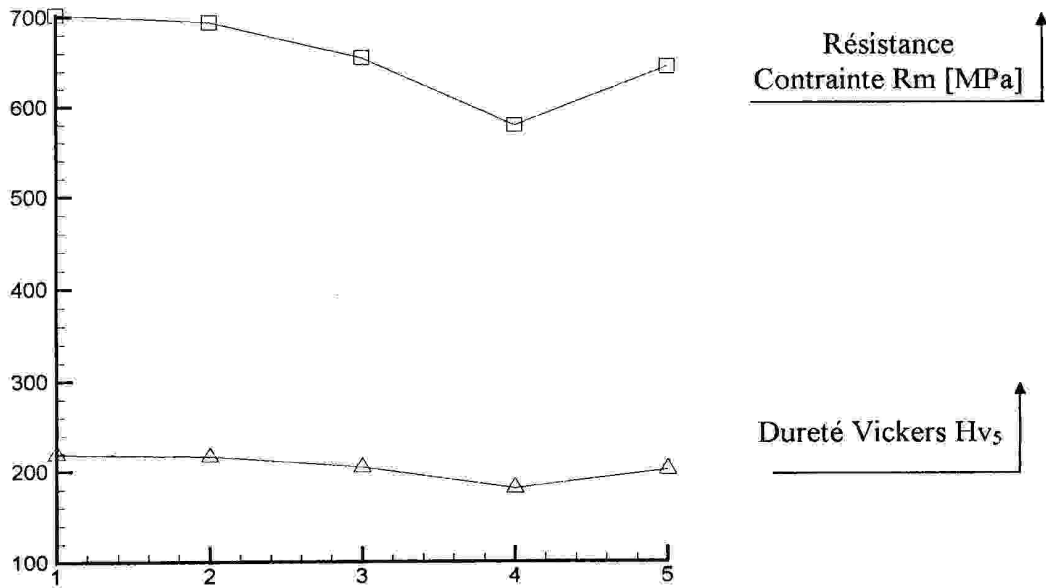


Fig. 3-18.
Micro dureté -coté face- Echantillon2
de la ZF

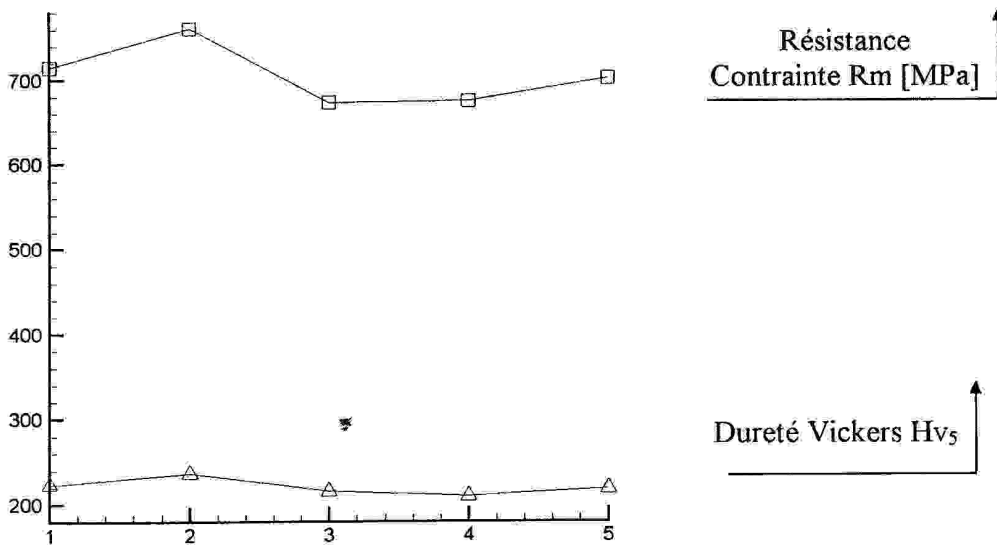


Fig. 3-19.
Micro dureté -coté racine- Echantillon2
de la ZF

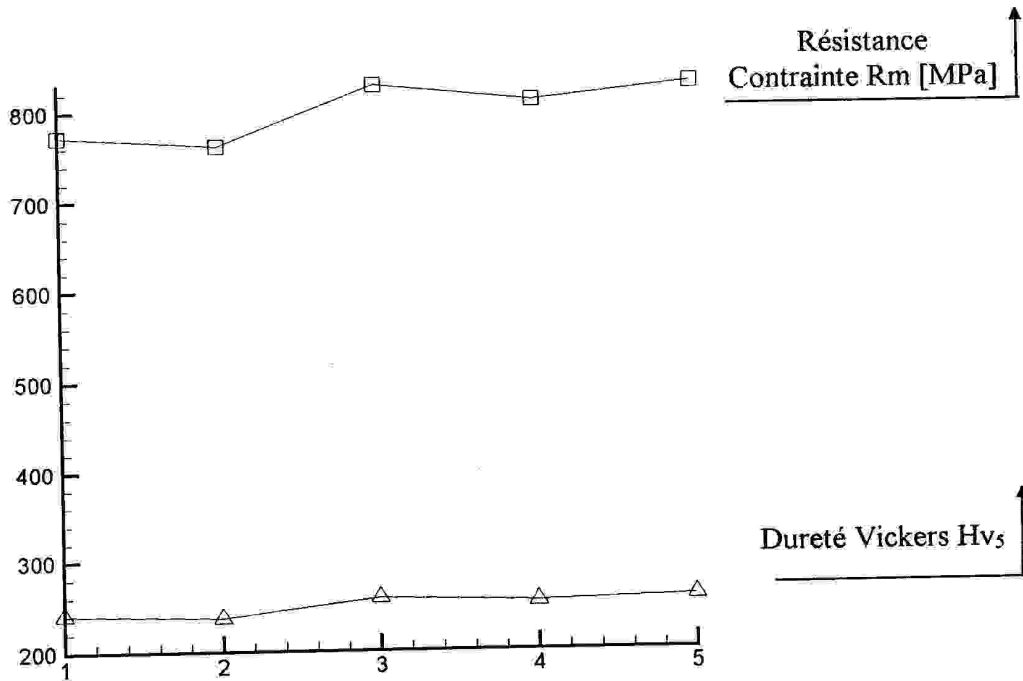


Fig. 3-20 .
Micro dureté -coté face- Echantillon4
de la ZF

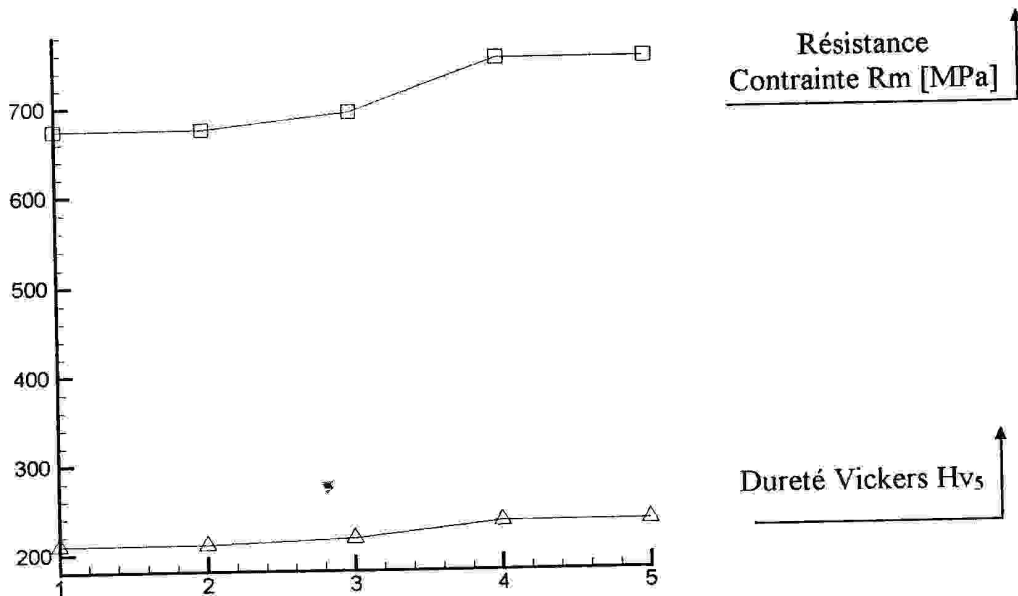


Fig. 3-21 .
Micro dureté -coté racine- Echantillon4
de la ZF

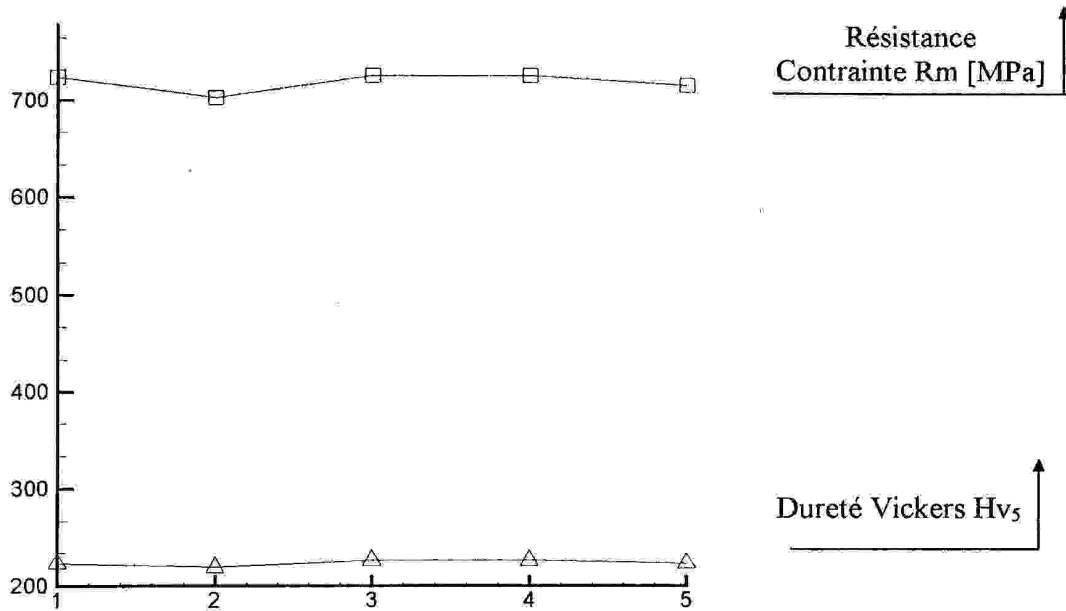


Fig. 3-22. Micro dureté -coté face- Echantillon3 de la ZF

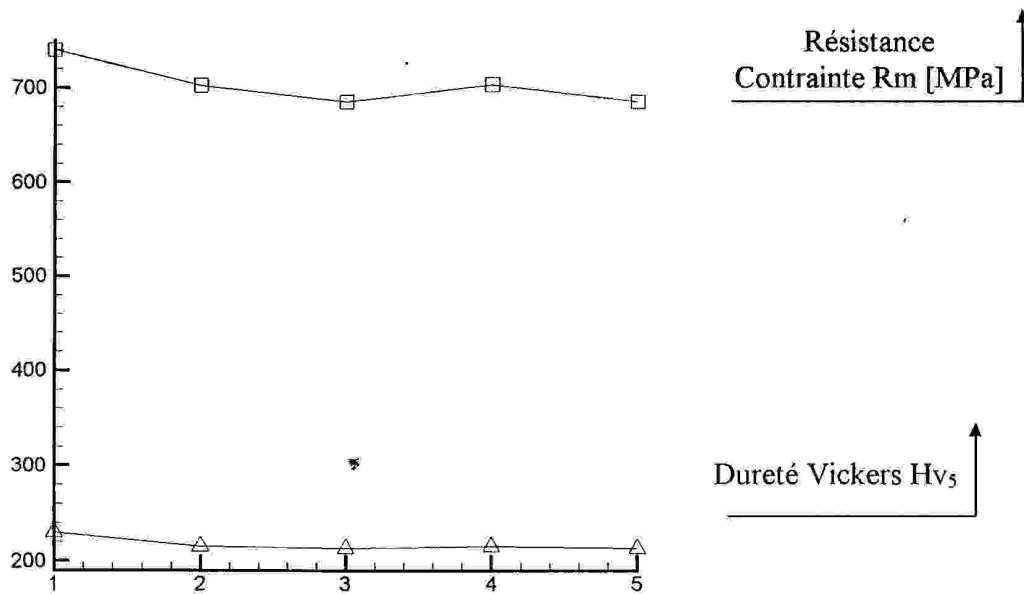


Fig. 3-23. Micro dureté -coté racine- Echantillon3 de la ZF

III.4. Etude Métallographique[19]

III.4.1. Macrographie

La macrographie est un examen d'ensemble, fait à faible grossissement, d'un produit métallique poli et attaqué.

Elle permet de vérifier l'orientation des fibres ou des cristaux du métal et de se rendre compte des défauts de constitution (manque de liaison entre cristaux, ségrégation...).

Donc cette étude a pour but fondamental la caractérisation à une échelle grossière de la structure du métal lors de son observation au microscope métallographique (de grossissement à cette échelle ne dépassera pas X 50).

III.4.2. Micrographique

C'est une métallographie microscopique qui permet de donner des indications nettes sur les modifications qui se produisent dans la structure du métal, par suite de traitements thermiques, chimiques et mécaniques.

L'examen micro-graphic est indispensable pour rendre compte avec précision des phénomènes métallurgiques qui se produisent en cours du soudage par exemple (notre cas d'étude).

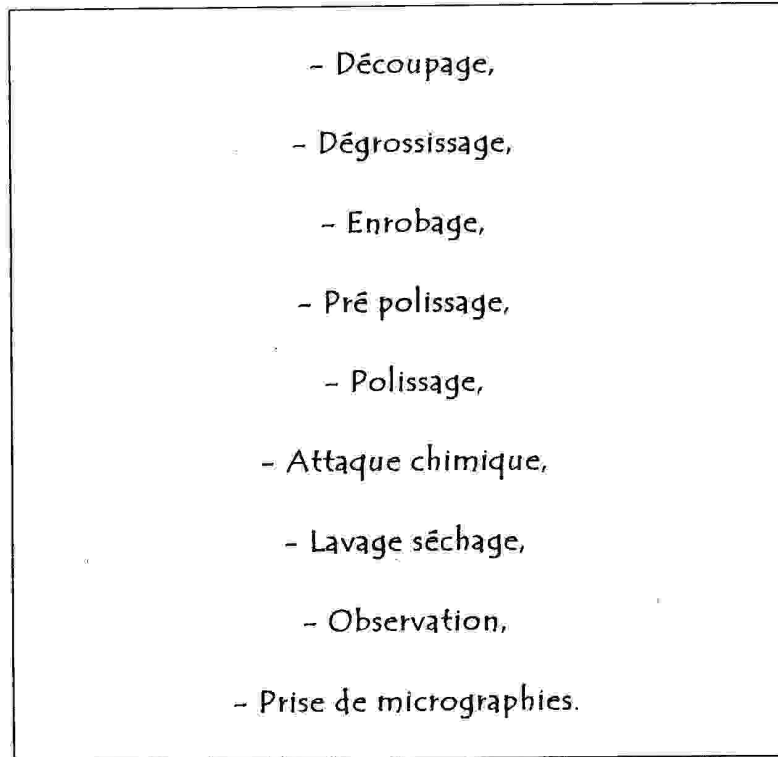
Le but major d'une telle analyses est d'analyser finement les différentes zones de la jonction soudée (zone fondue, zone affectée par la température, métal de base).

Le grossissement, dans cette étude peut aller jusqu'à:

- 1200 X dans le cas d'un microscope optique.
- 100000 X dans le cas d'un microscope électronique à balayage.

III.4.3 Techniques Opératoire

Organigramme à suivre (du procédé métallographique):



III.4.3.1 : Préparation des échantillons

De chaque éprouvette soudée, nous avons prélevé à l'aide d'une coupe transversale 3 échantillons des 3 zones différentes (MB, ZAT, ZF) de 10mm (longueur et largeur) et de 4mm d'épaisseur.

La préparation de ces échantillons suivant le même procédure que l'analyse spectrale (découpage et surfacage) pour obtenir des surface régulières.

- Polissage

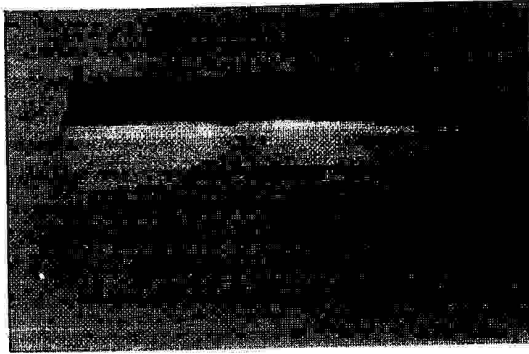
Nous avons procédé à un polissage des échantillons avec du papier abrasif de granulométries croissante (80, 120,, 1200) puis nous avons continuer le polissage avec la pâte de diamant à verre lubrifié mélangé avec de l'alcool.

- Attaque chimique

Une attaque chimique avec nitale (4ml d'Acide nitrique (HNO_3) + 96ml d'alcools éthylique ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)) suivie d'un rinçage à l'eau bi-distillée.

- Réalisation des macrographies

Grâce à un appareil photographique standard, nous avons pris des macrographies de chaque échantillon d'éprouvette attaquée par le nital. Les figures (3-24) respectivement représentent l'allure macrographique des différentes phases étudiées.



*Fig. a- face disposée coté racine en haut
(soudure bout à bout)*

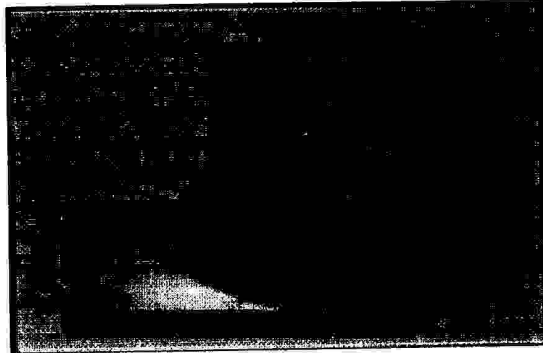
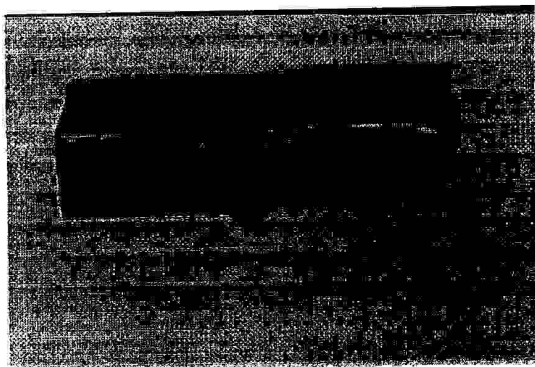


Fig. b- (soudure en T)



*Fig. c- face disposée coté passe de
finition en haut
(soudure bout à bout)*

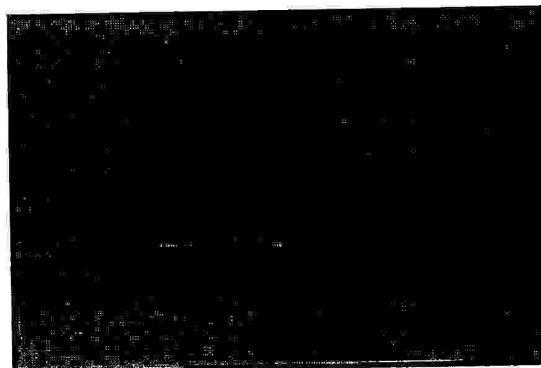


Fig. d

Fig. (3-24- a, b, c, d) macrographie des joints soudés pour les échantillons d'épaisseurs (1,1.5,2,2.5)

III 4.3.2 Interprétation des macrographies

La macrographie relevée l'existence de 4 zones :

- La zone fondue (ZF).
- La zone de liaison (ZL).
- La zone affectée thermiquement (ZAT).
- Métal de base (MB).

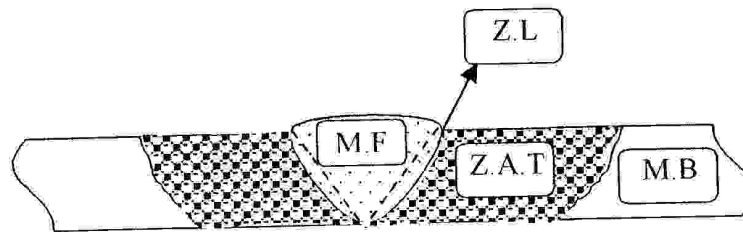


Fig. 3-25. macrographie d'un joint soudée

- Réalisation des micrographies

A l'aide d'un microscope optique de type LEITZ METTALLUX- 2, nous avons pris des photos des microstructures des différentes régions à partir du métal de base (MB) en passant avec des grossissements de 50, 100, 200, et enfin 500. Ces grossissements peuvent atteindre jusqu'à presque 4000 à l'aide du microscope électronique à balayage. Voir figure 3-26.

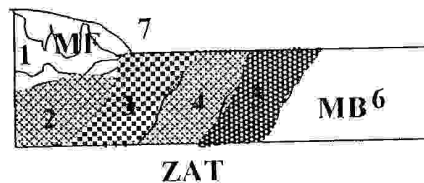


Fig. 3-26. Microstructure d'un joint soudée.

- Métal fondu (MF)

- 1- zone basaltique : structure dendritique
- 2- zone initialement basaltique normalisée par la dernière passe

- Zone affectée par la chaleur (ZAT)

- 3- zone de surchauffe : structure de ferrite aciculaire
- 4- zone austénisée : structure ferrito-perlitique à gros grains
- 5- zone partiellement austénisée : structure ferrito-perlitique à grains fin (Austénite régénérée).

- **Métal de base (MB)**
6- zone non affecté par la chaleur
- **Zone de liaison (ZL)**
7- interface ZF/ZAT

Les photos ci-dessous montre bien ces microstructures

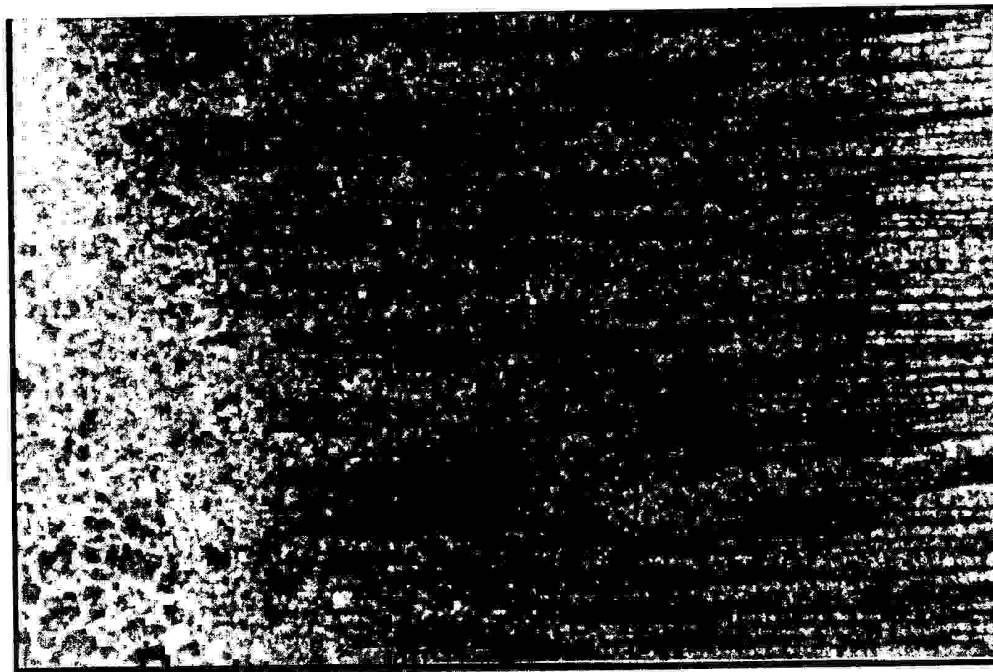


Fig.3-27. Vue optique de l'ensemble ZF-ZAC-MB (TQ46 – SG3)
(G × 50)

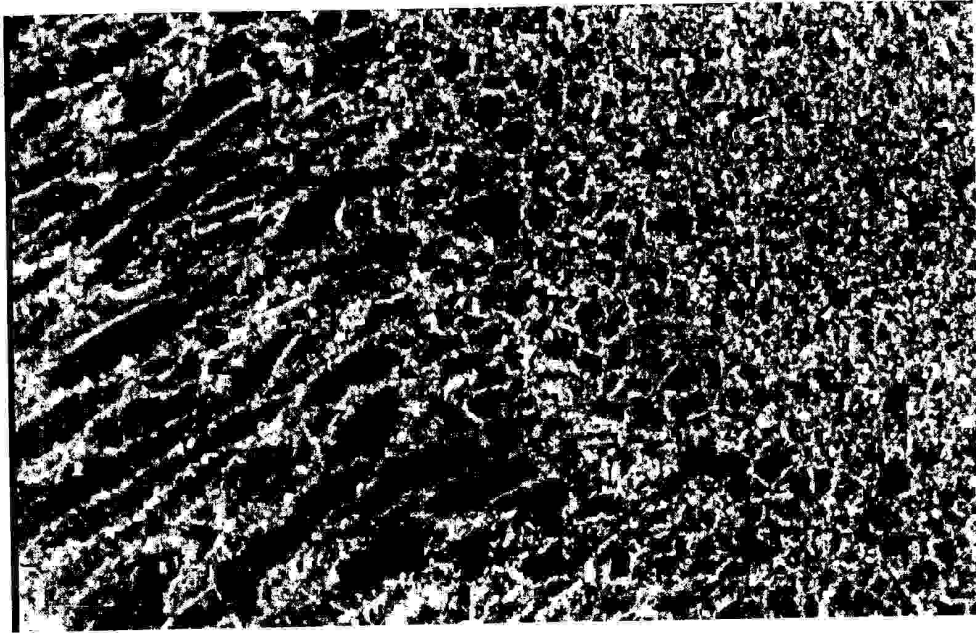


Fig.3-30. ZF (aspect basaltique) – ZAC « G ×200 » (Naxtra)

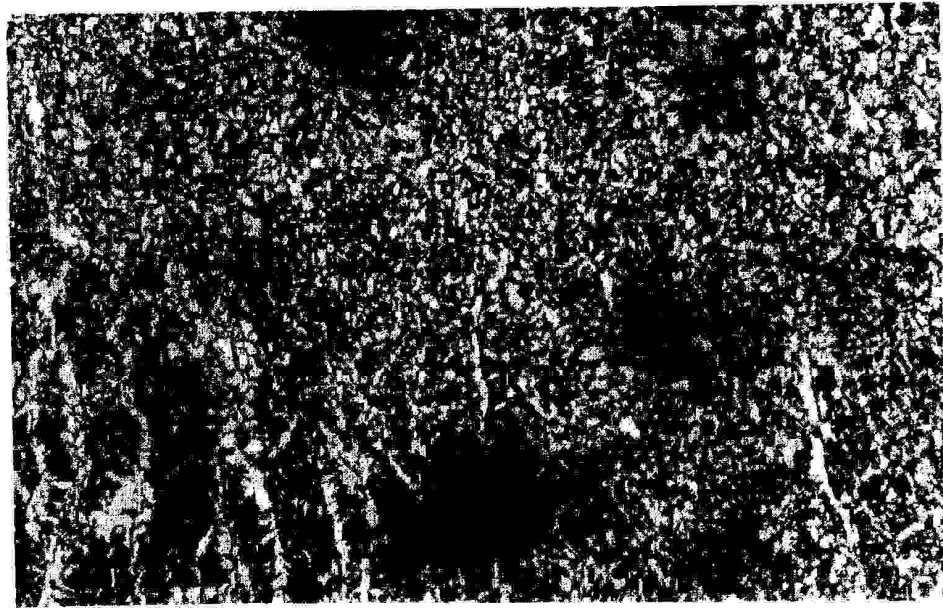


Fig.3-31. ZF – ZAC « G ×100 »

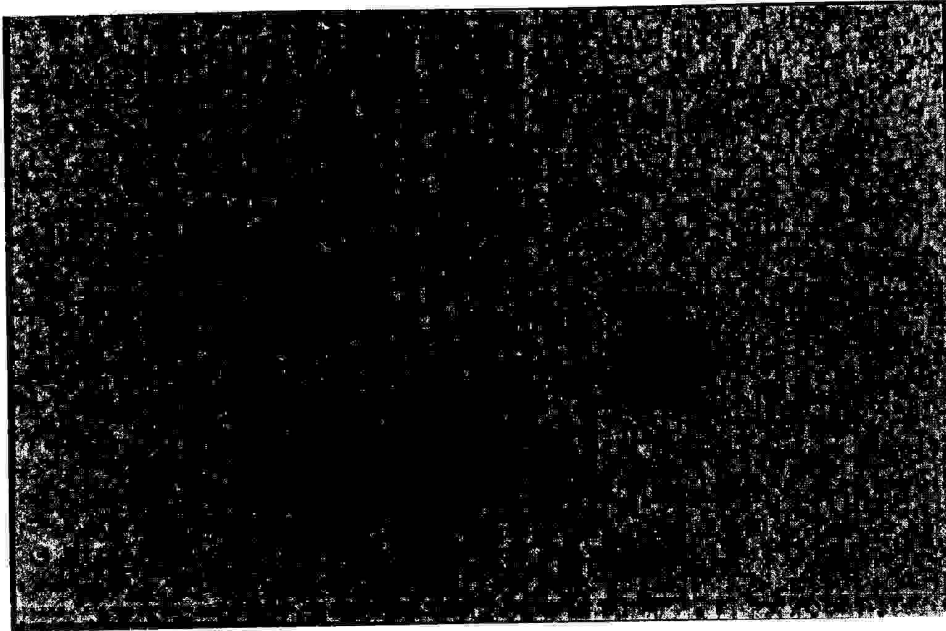


Fig.3-32. ZAC - MB « G × 50 » (TQ46 – SG3)

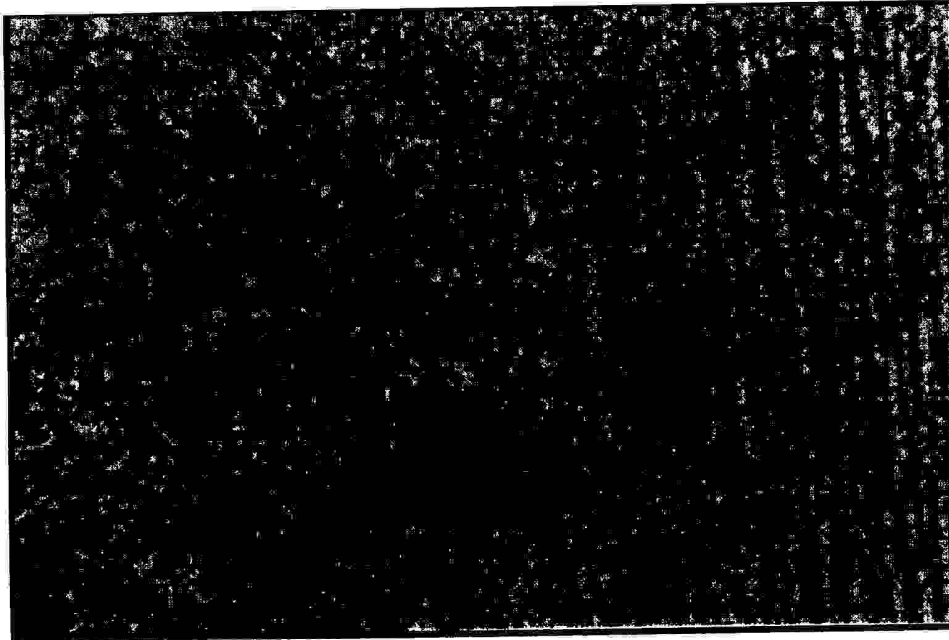


Fig.3-33. ZF - ZAC - MB « G × 50 » (TQ46 – SG3)



Fig.3-34. ZAC « G x 200 » (TQ46 – SG3)

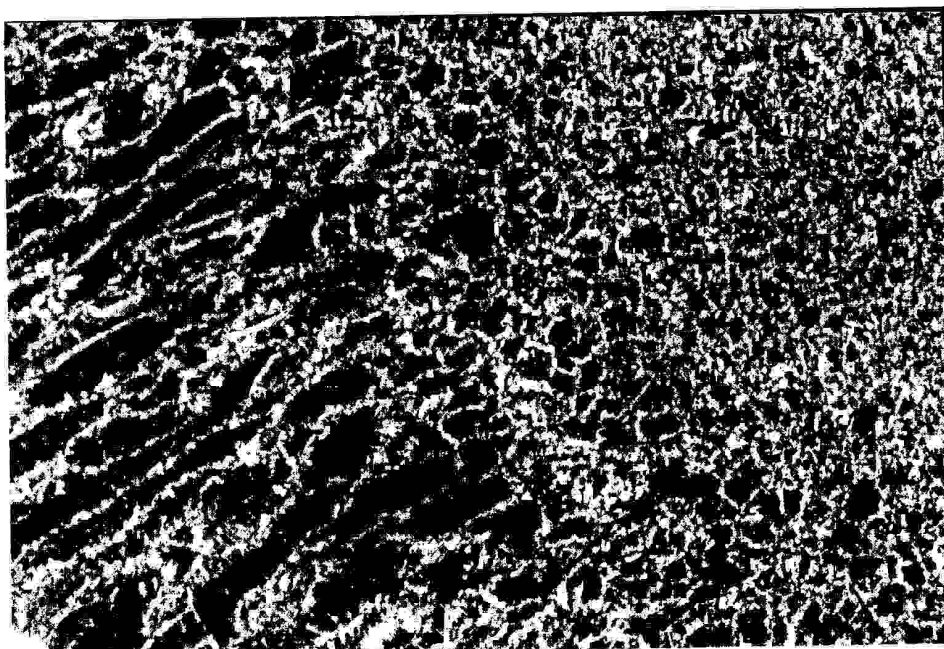


Fig.3-35. ZF (aspect basaltique) – ZAC « G x 100 » (Naxtra)

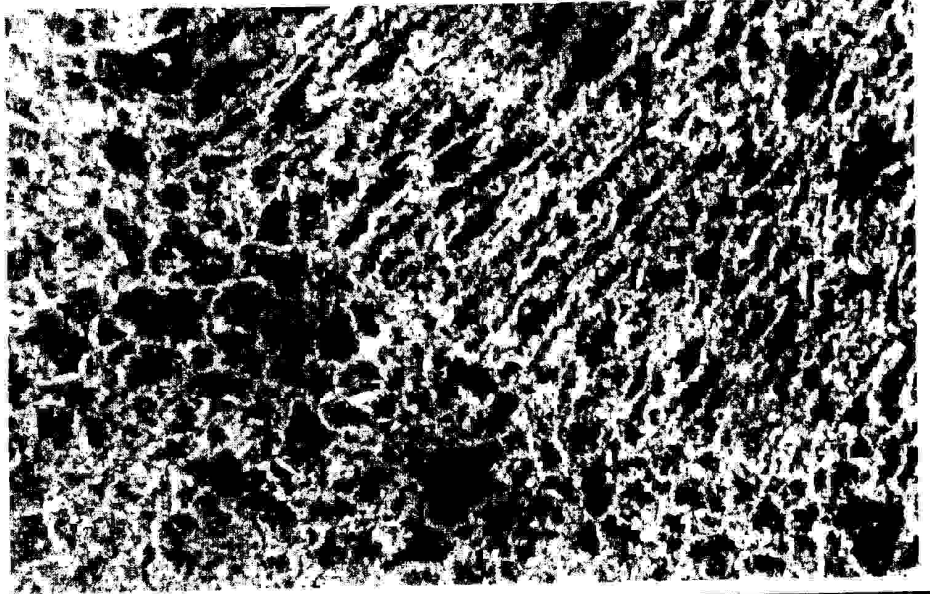


Fig.3-36. ZAC – ZF (aspect basaltique) « G ×100 » (Naxtra)



Fig.3-37. ZF (aspect basaltique) – ZAC « G × 200 » (TQ46 – SG3)

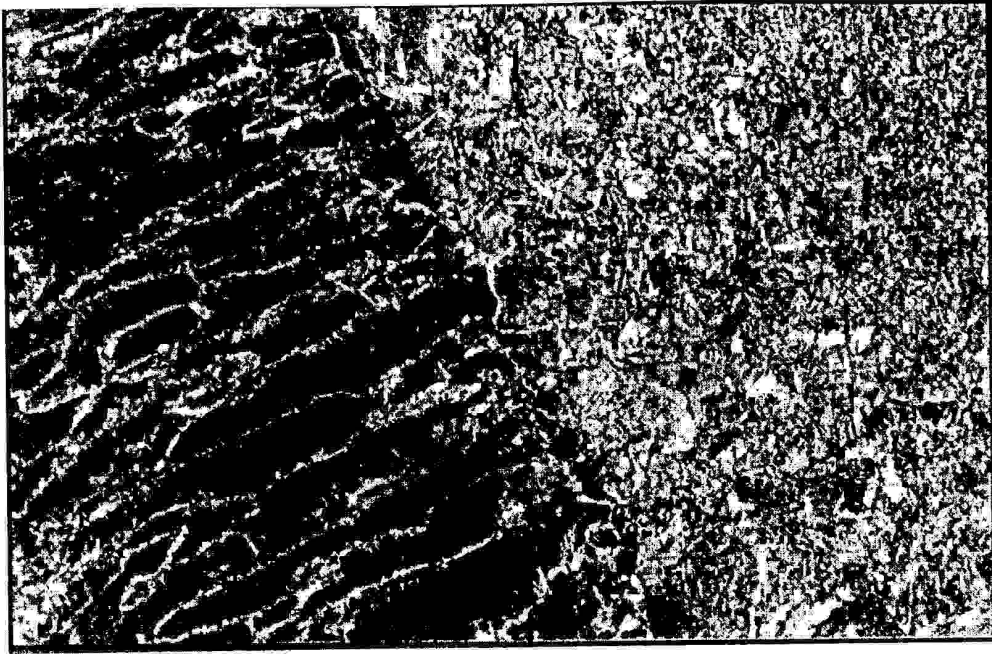


Fig.3-38. ZF (aspect basaltique) – ZAC « G × 100 » (TQ46 – SG3)

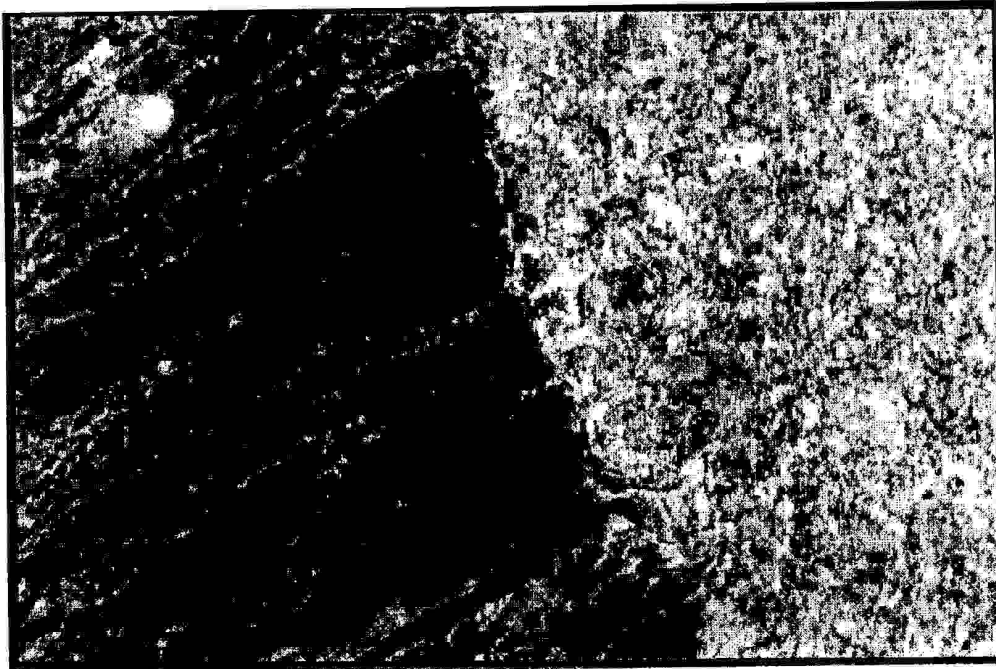


Fig.3-39. ZF (aspect basaltique) ZAC « G × 200 » (TQ46 – SG3)

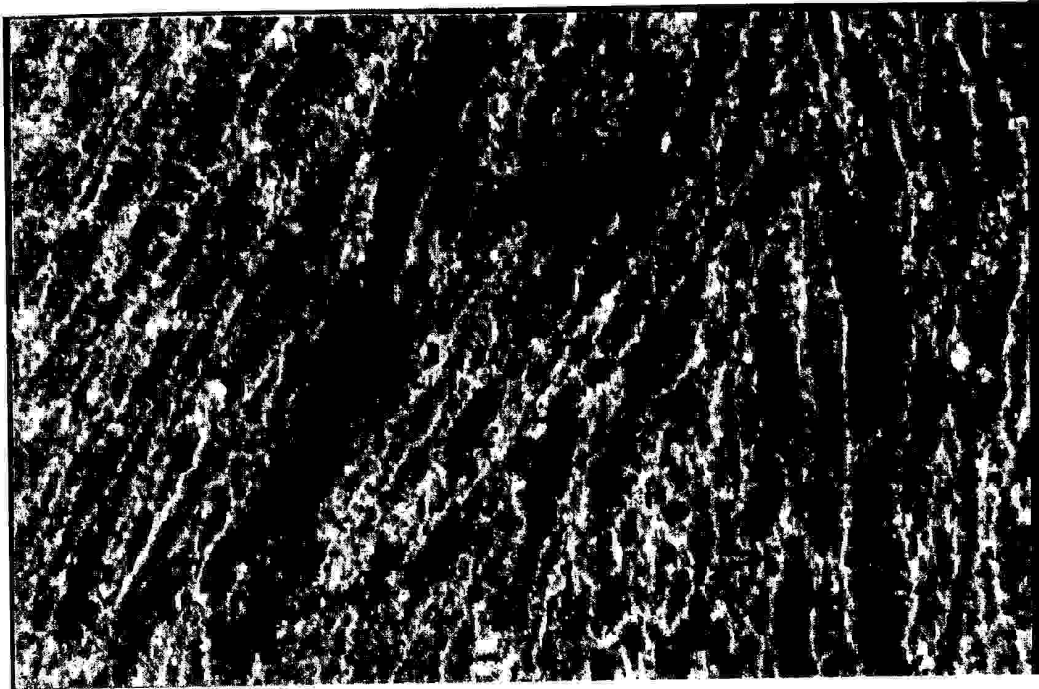


Fig.3-40. ZF (aspect basaltique) « G \times 200 » (TQ46 – SG3)

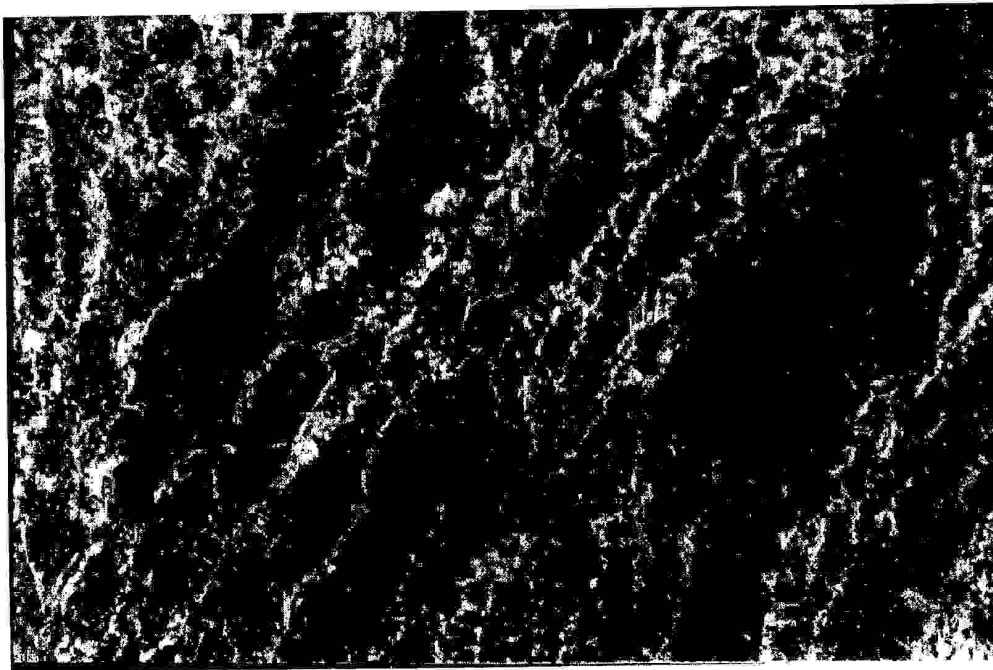


Fig.3-41. ZF (aspect basaltique) « G \times 200 » (TQ46 – SG3)

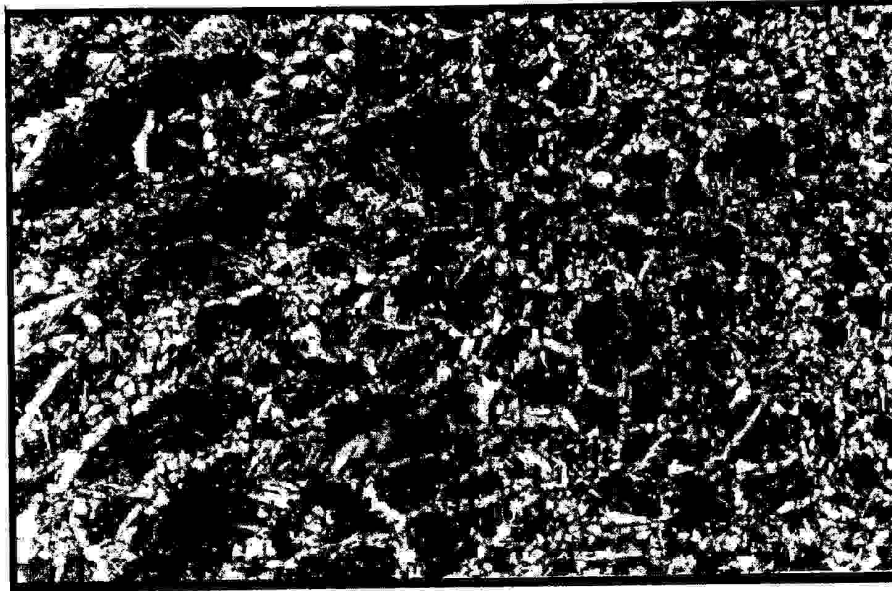


Fig.3-42. ZF (aspect basaltique) - ZAC « G x 100 » (Naxtra-SG3)

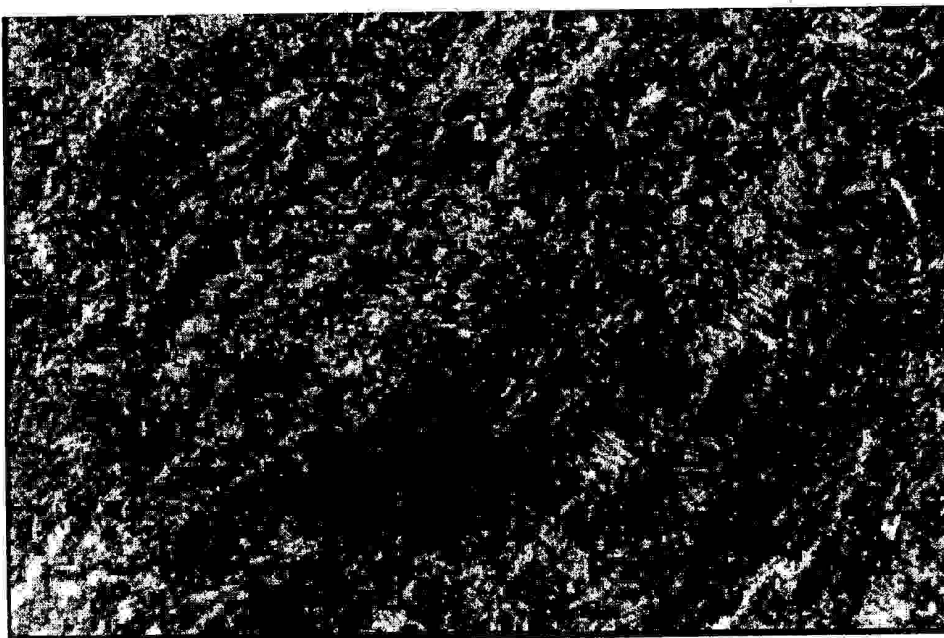


Fig.3-43. ZF « G x 50 » (TQ46 - SG3)

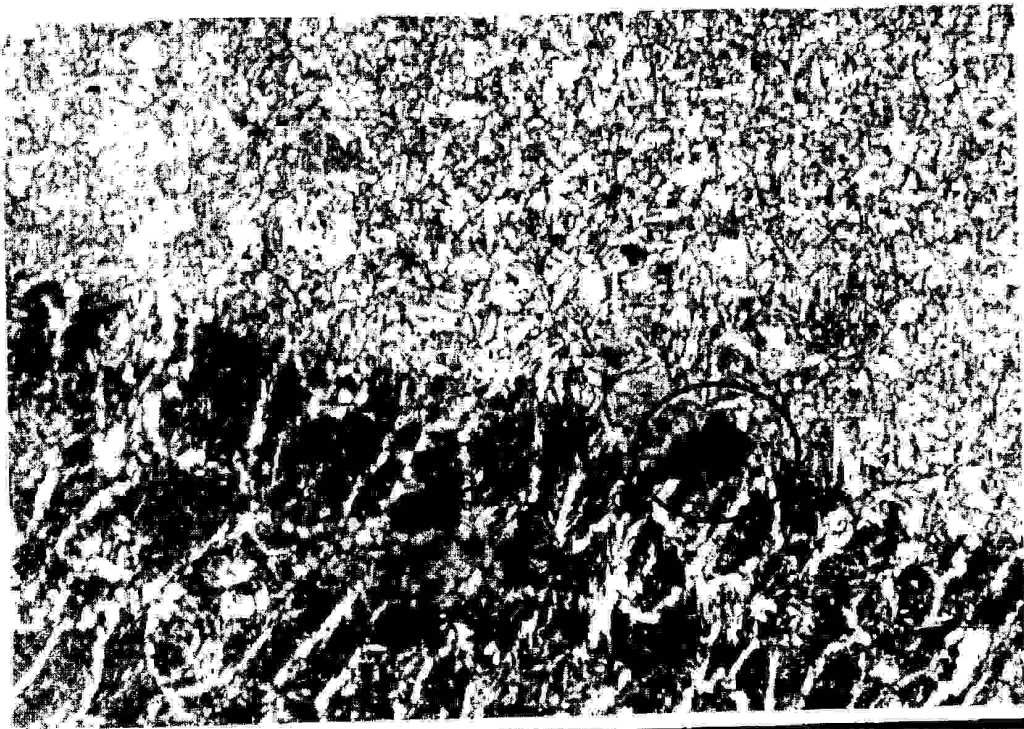


Fig.3-44. Echantillon avec empreinte de microdureté « G × 200 »
(TQ46 – SG3)



Fig.3-45. ZF – ZAC – MB (porosité) « G × 100 »
(TQ46 – SG3)

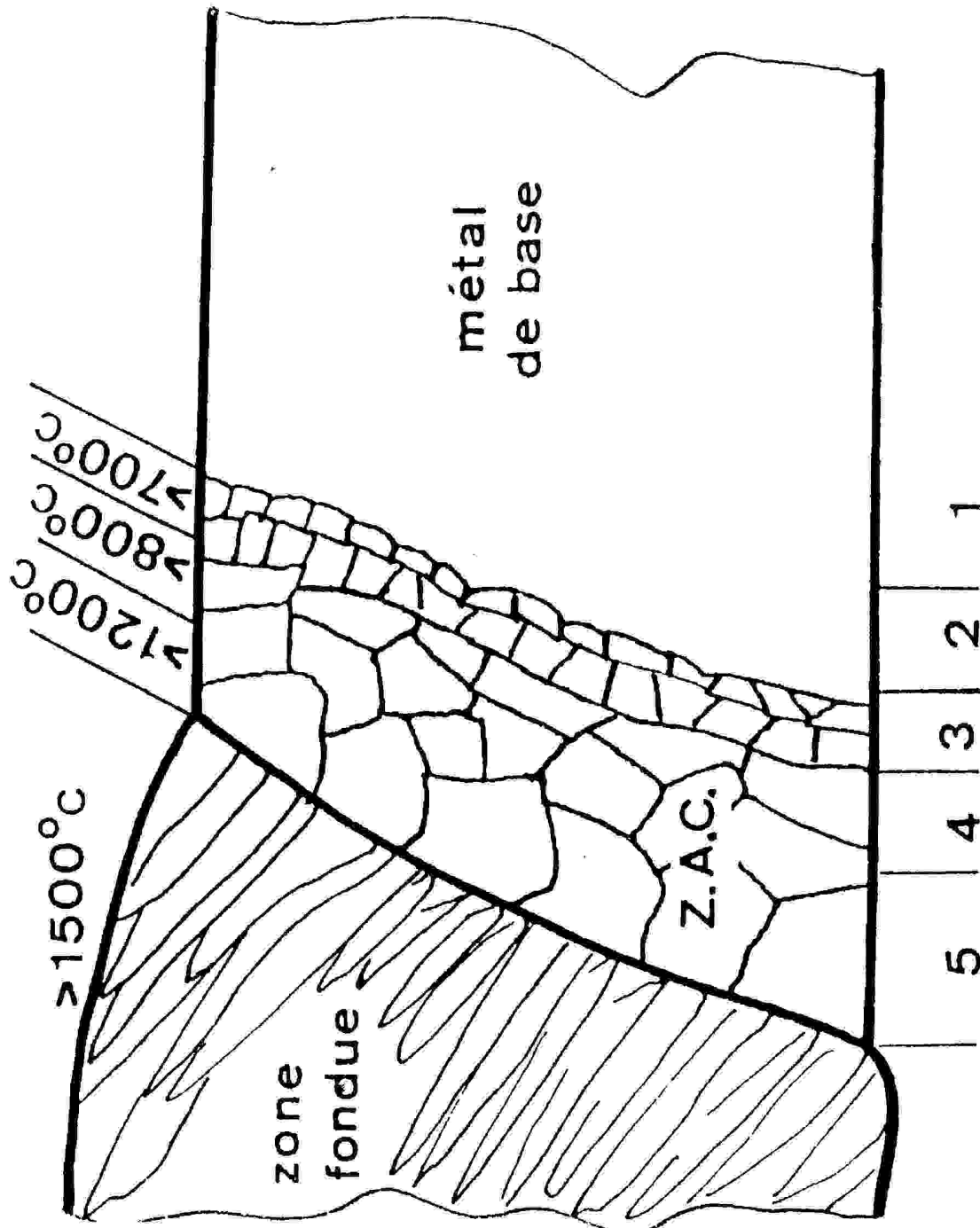


Fig. 3-46. Représentation schématique des différents zones dans un joints soudé [20]

Echantillon-TQ46 -

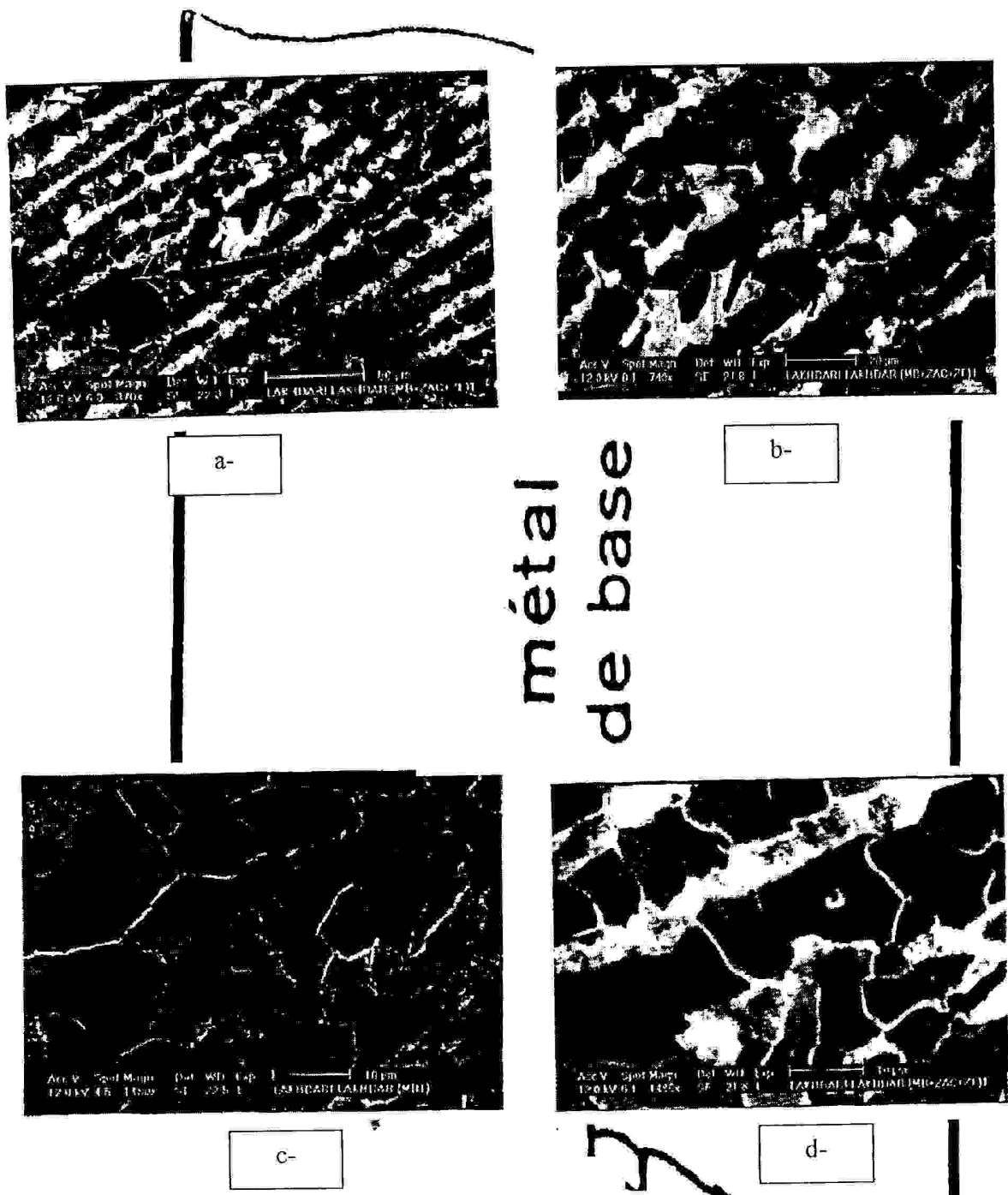


Fig. 3-47. Métal de base
- Structure en perlite-ferritique en bandes.
(zones noires ferrite, zones blanches perlite)[21]

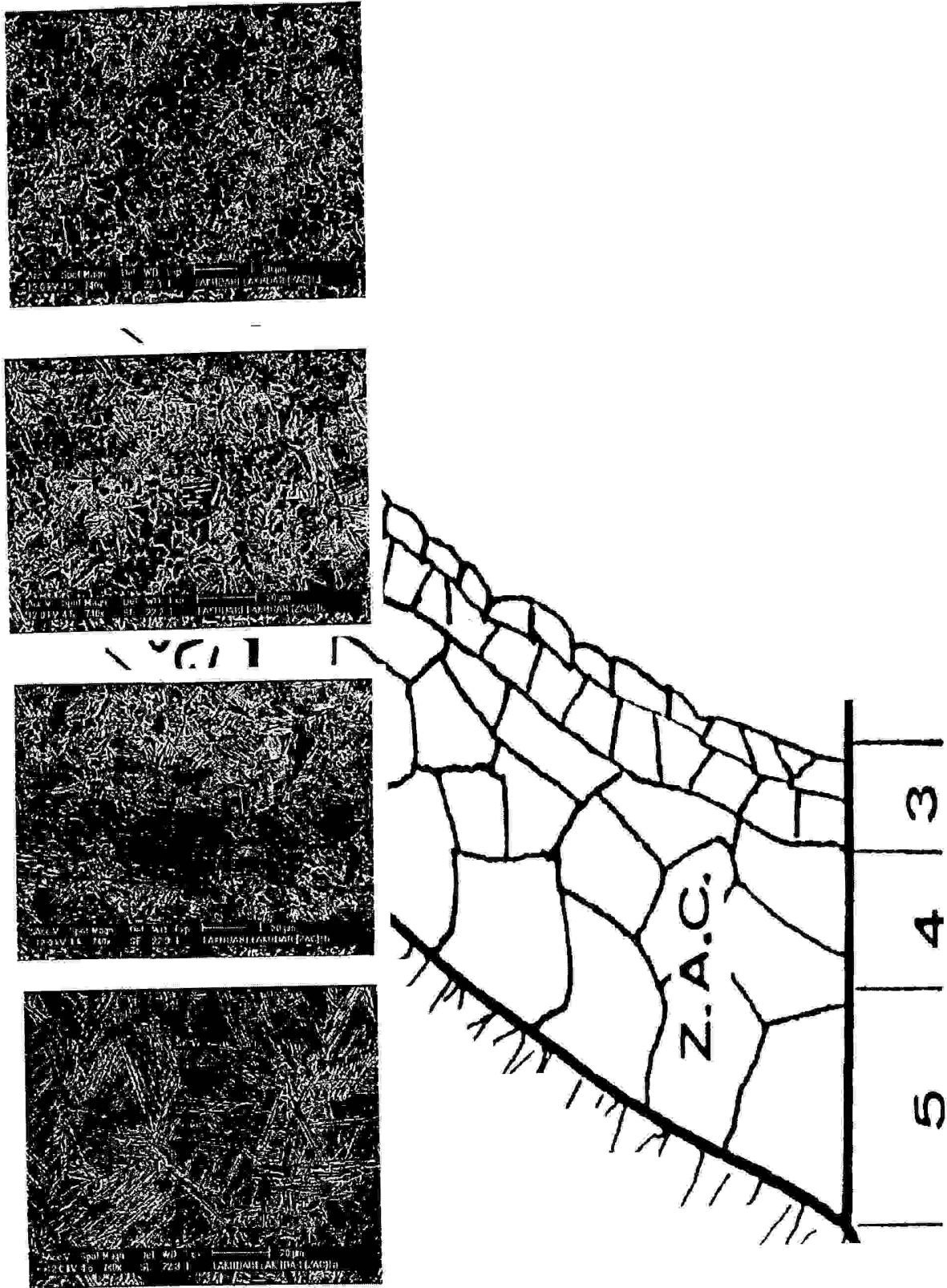


Fig. 3-48. ZAC
- Structure bainitique.-TQ46

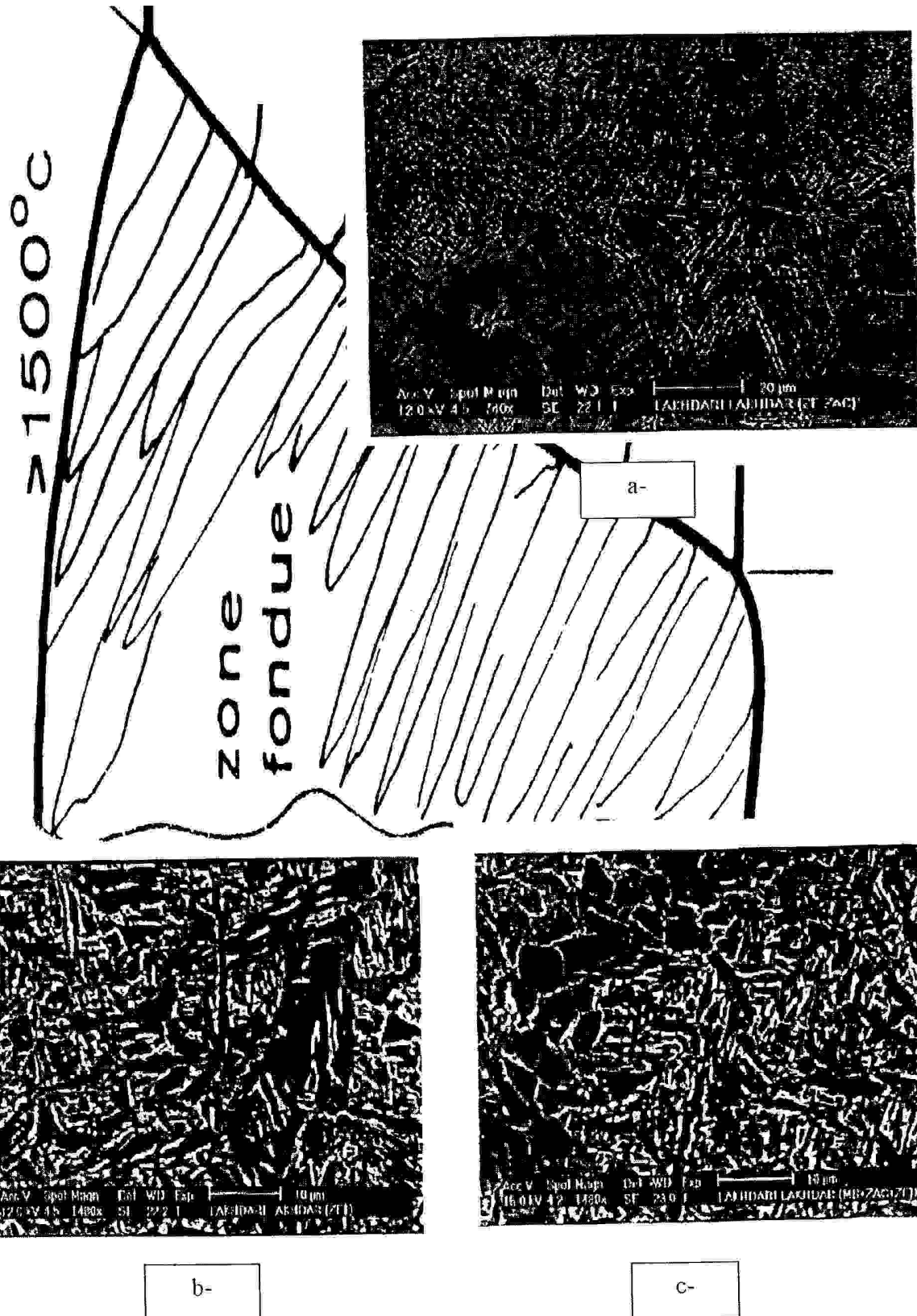
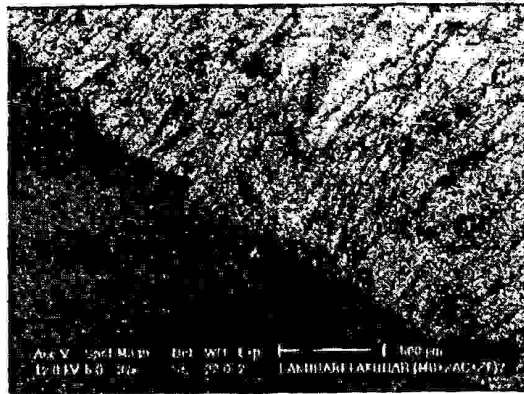
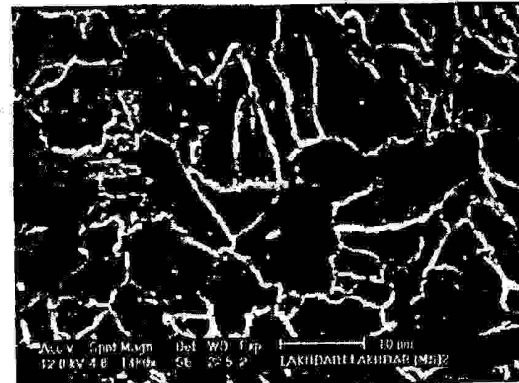


Fig. 3-49. ZF
- Structure bainitique. TQ46-SG3

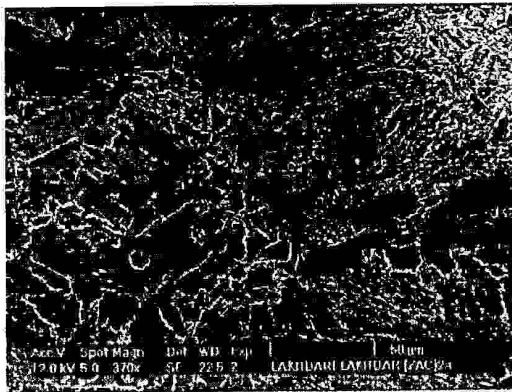
Echantillon Q36-SG3



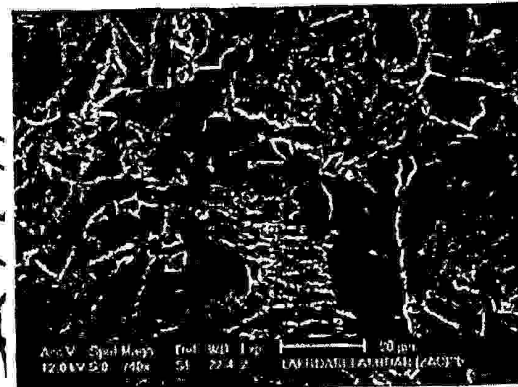
a- vue du joint soudé



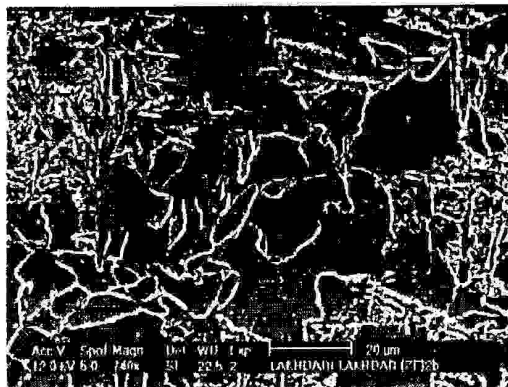
b- Métal de base



c- ZAC



d- ZAC



e- ZF



f- ZF

Fig. 3-50. – Structures des différentes zones du joint soudé (O36)

Echantillon « Naxtra »

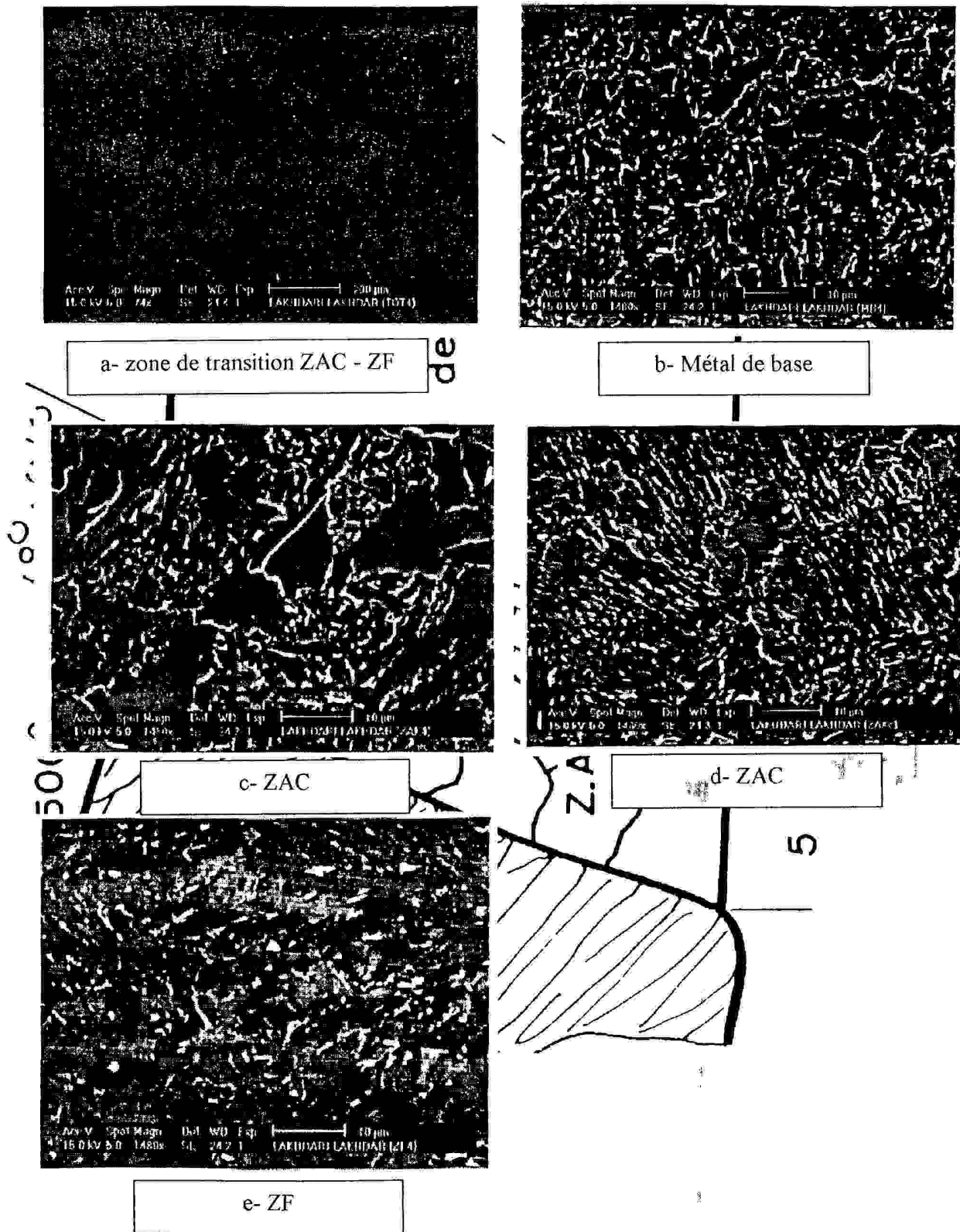


Fig. 3-51. – Structures des différentes zones du joint soudé (Naxtra)

Echantillon « Naxtra »

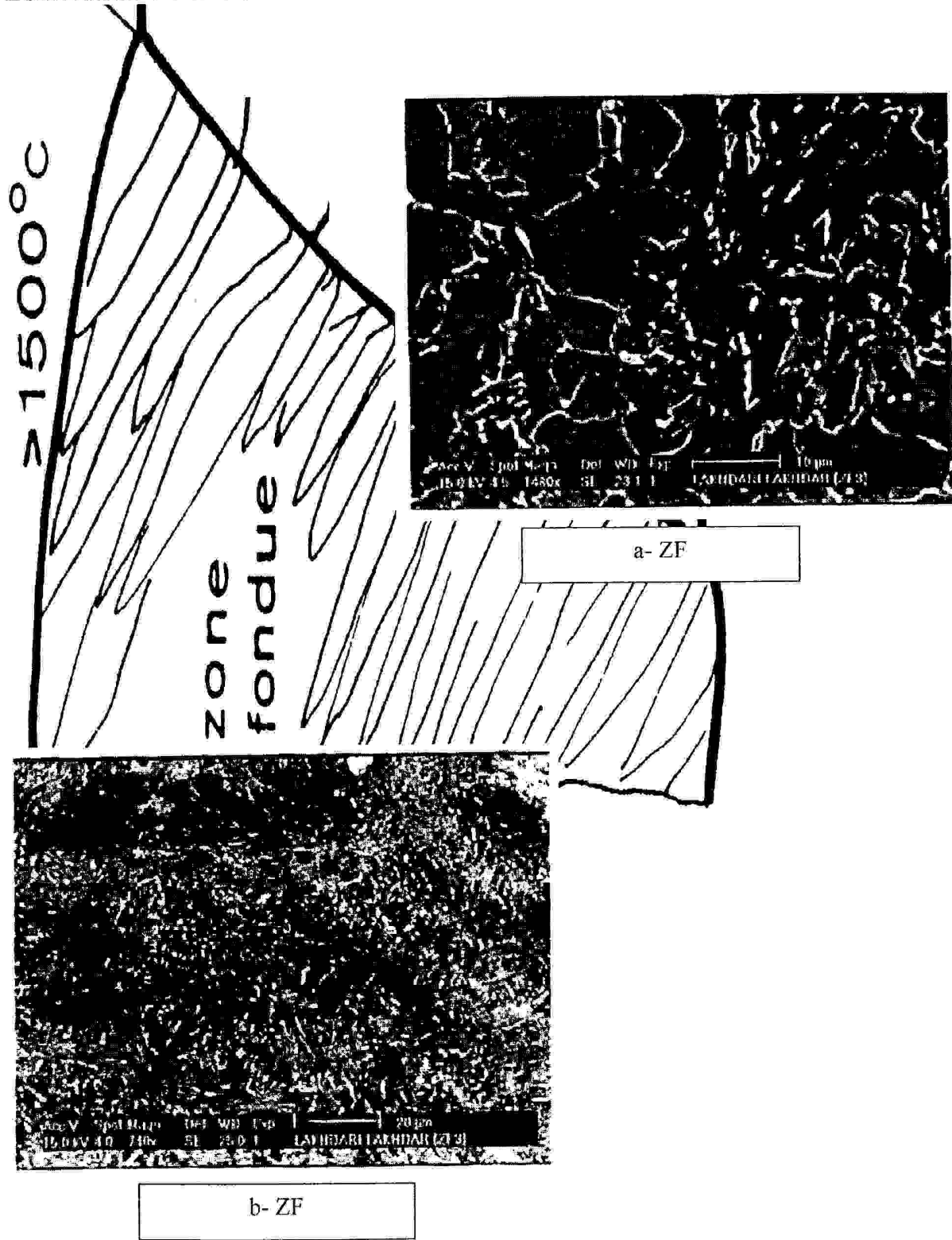


Fig. 3-52. – Structures des différentes zones du joint soudé (Naxtra)

III.5-Effets des gaz :

Il s'avère que l'un des facteurs prédominant dans la qualité d'un joint soudé est sa propreté ou de façon plus explicite la non-existence ou la non-présence des gaz dans celui-ci. Ces gaz peuvent provenir soit avant soudage ou lors du soudage et se figer dans la structure après soudage.

En effet, un joint mal effectué peut revenir au fait que les surfaces à joindre ont été mal nettoyées au préalable, c'est-à-dire que celles-ci pouvaient contenir des oxydes en surface ou peuvent être humides lequel cas ceux-ci dégageraient de l'oxygène et de l'hydrogène lors de l'opération de soudage. Ajouter à ceci la présence de calamine en surface pouvant être à l'origine d'éléments nocifs entrant dans la composition du joint final.

Dans notre cas nous avons constaté la présence de soufflures vermiculaires, ainsi que d'autres soufflures de types « fish eyes » témoignant de la présence de l'hydrogène essentiellement et qui ont tendance à migrer vers la surface (les bulles du gaz, leur empreinte reste figées après solidification comme en témoignent les micro des pages suivantes).

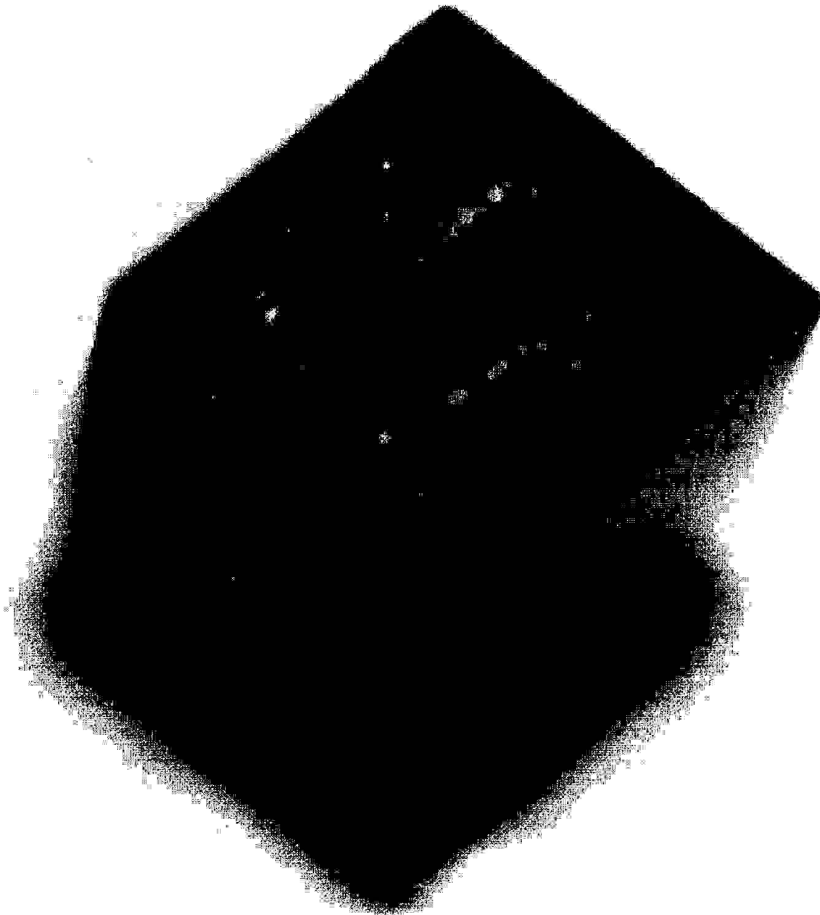


Fig. 3-53 Aspect macrographique de l'effet des gaz

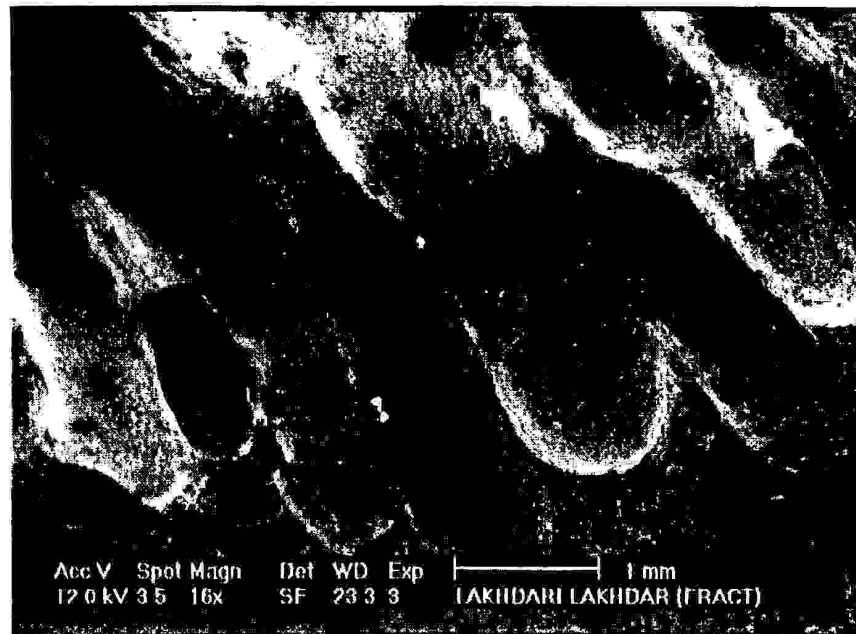


Fig. 3-54.a-

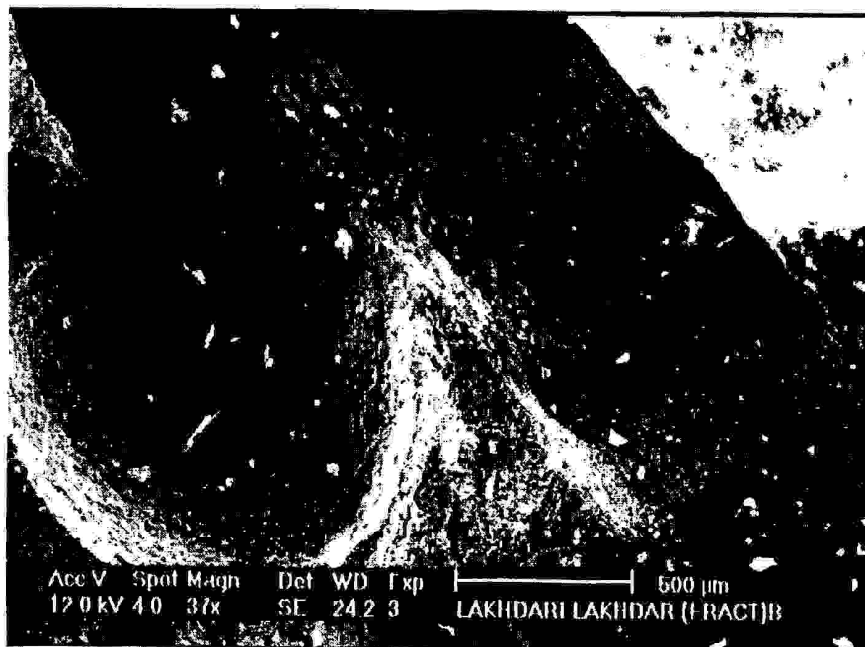


Fig. 3-54.b-

Fig. 3-54. – Effet des gaz, soufflures vermiculaires.

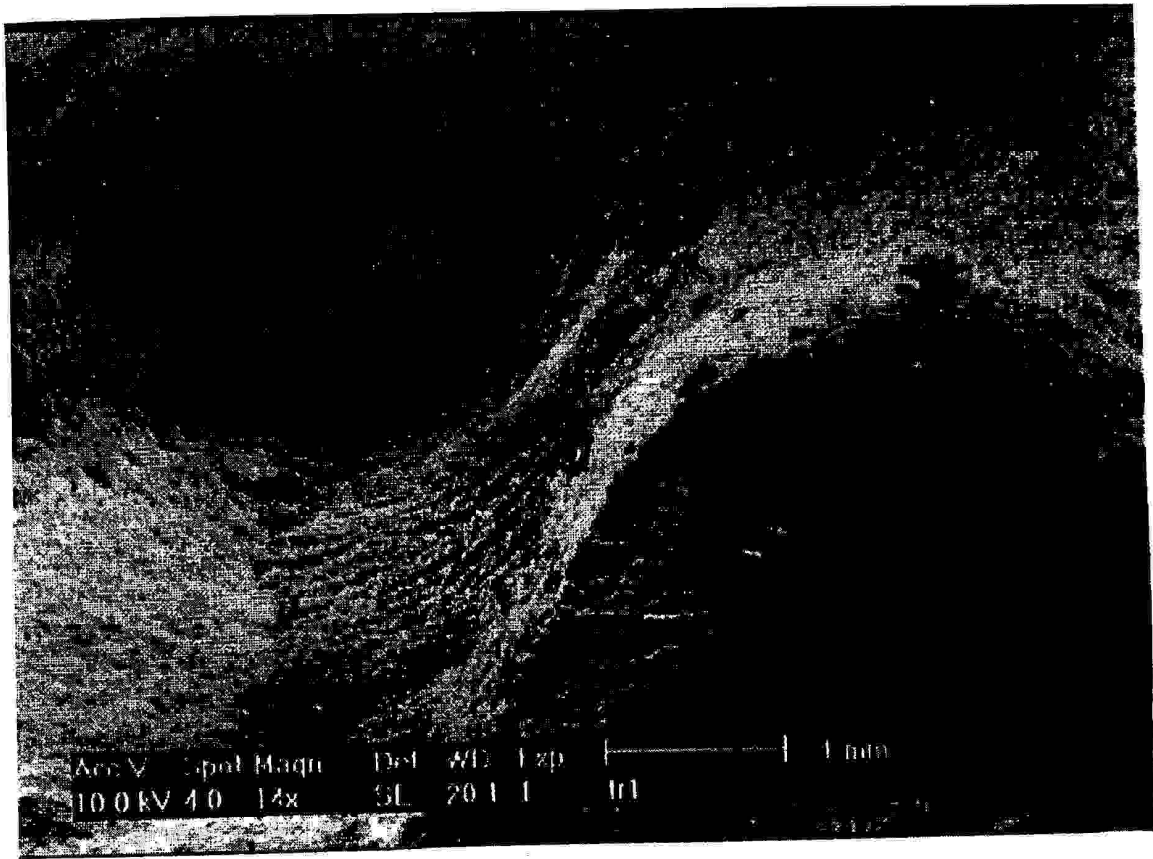
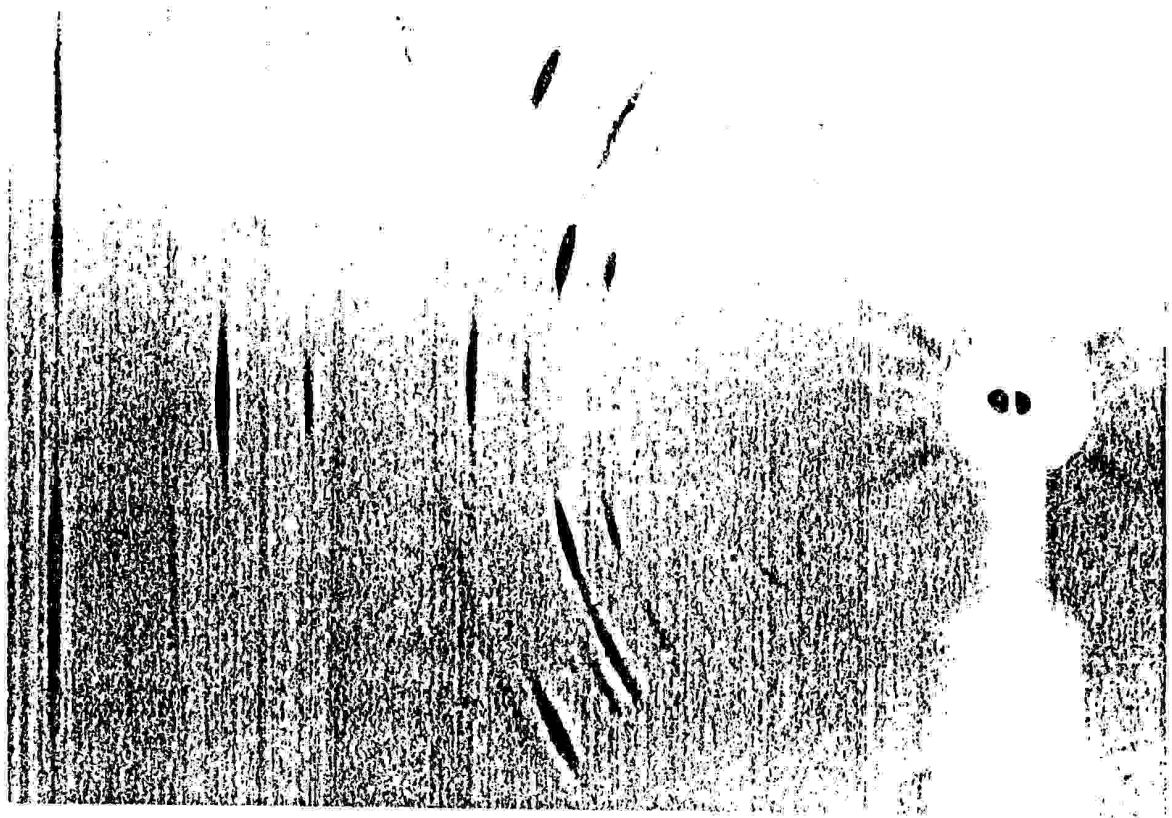


Fig. 3-55. – Fish eyes.



RADIOCRISTALLOGRAPHIE

III.6.ETUDE PAR RAYONS X [22]

III.6.1.Diffinition :

Les rayons X sont des vibrations (ondes) électromagnétiques analogues aux vibrations lumineuses, mais de longueur d'ondes environ 10^3 fois plus petites, elle est pratiquement comprise entre 0.02 et 100\AA environ ; ainsi que les rayons X on retrouve dans le large domaine des radiations (fig.3-56).

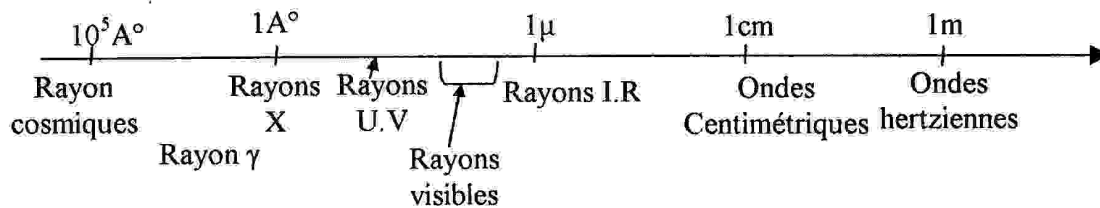


Fig. 3-56 Les Rayons X dans l'échelle des longueurs d'ondes

III.6.2.La diffraction des rayons X :

C'est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. Cette méthode ne s'applique, jusqu'à récemment, qu'à des milieux cristallins tels que : roche, cristaux, minéraux, pigments, argiles, etc.

Ces derniers présentent, en effet, les caractéristiques de l'état cristallin c'est à dire un arrangement *périodique ordonné* d'atomes dans des plans réticulaires (hkl).

La méthode permet aussi clairement de distinguer les produits amorphes (verres...) des produits cristallisés.

La diffraction des rayons X sur poudre est une méthode d'analyse des phases non destructive. Au début de son introduction (années 1910), la diffraction des rayons X était utilisée surtout pour déterminer les structures des cristaux.

III.6.3.Diffraction des rayons X : loi de BRAGG :

Si l'on considère un ensemble de plans réticulaires (hkl) équidistants de d , il y a diffraction lorsque de loi BRAGG est satisfaite, a savoir (fig.3-57) :

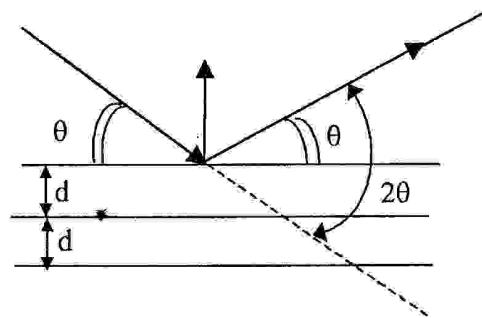


Fig. 3-57. Diffraction des Rayons X

$$2.d \sin \theta = n \lambda$$

λ : longueur d'onde incidente

θ : angle de BRAGG

n : ordre de la diffraction.

Cette relation signifie que la diffraction ne s'effectue que dans certaines directions repérées par les angles θ ; de plus, il faut noter que la longueur d'onde λ étant connu la mesure de θ permet de calculer la valeur de d .

III.6.4.Application aux échantillons :

Nous avons effectué cette étude dans les Laboratoires de Recherche de Physique de l'Université de Constantine.

Pour la mise en évidence des phases présentes dans notre alliage nous avons examiné réflexion. Ces échantillons de petites dimensions $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$. Les spectres obtenus ont été enregistrés au moyen d'un diffractomètre.

III.6.5.Analyse par rayons X

Les conditions expérimentales utilisées lors des analyses par rayons X :

- Appareillage : D8 advence

Paramètres :

- $\lambda_{\text{Cu}} = 1,5409 \text{ \AA}$
- Filtre : Ni
- Tension $V = 25 \text{ kV}$
- Intensité appliqué : $I = 20 \text{ mA}$
- Angle de démarrage : $2\theta = 20^\circ$
- Angle final : $2\theta = 120^\circ$

- Vitesse de défilement 3h pour 100° c'est à 0.55 dég/min
- Analyses des zones constrictives du joint soudé

L'analyse par rayons X a été effectuée sur les 3 zones considérées macroscopiquement différentes, à noter que les rayons X sont sensibles à la présence des phases différentes toutefois une présence en % relatif inférieur à 5% d'un composé ou phase dans la matrice, peut ne pas être détecté.

L'ensemble des 3 diffractogrammes séparés et/ou rassemblés sur un même graphe, montrent que nous avons dans tous les cas une prédominance de phases ferritique caractérisée par ces pics diffractants (relatifs à la structure cubique centrée)

- (110) du Fe_α à $2\theta = 45^\circ$
- (200) du Fe_α à $2\theta = 65^\circ$
- (211) du Fe_α à $2\theta = 83^\circ$
- (220) du Fe_α à $2\theta = 98^\circ$
- et (310) du Fe_α à $2\theta = 117^\circ$

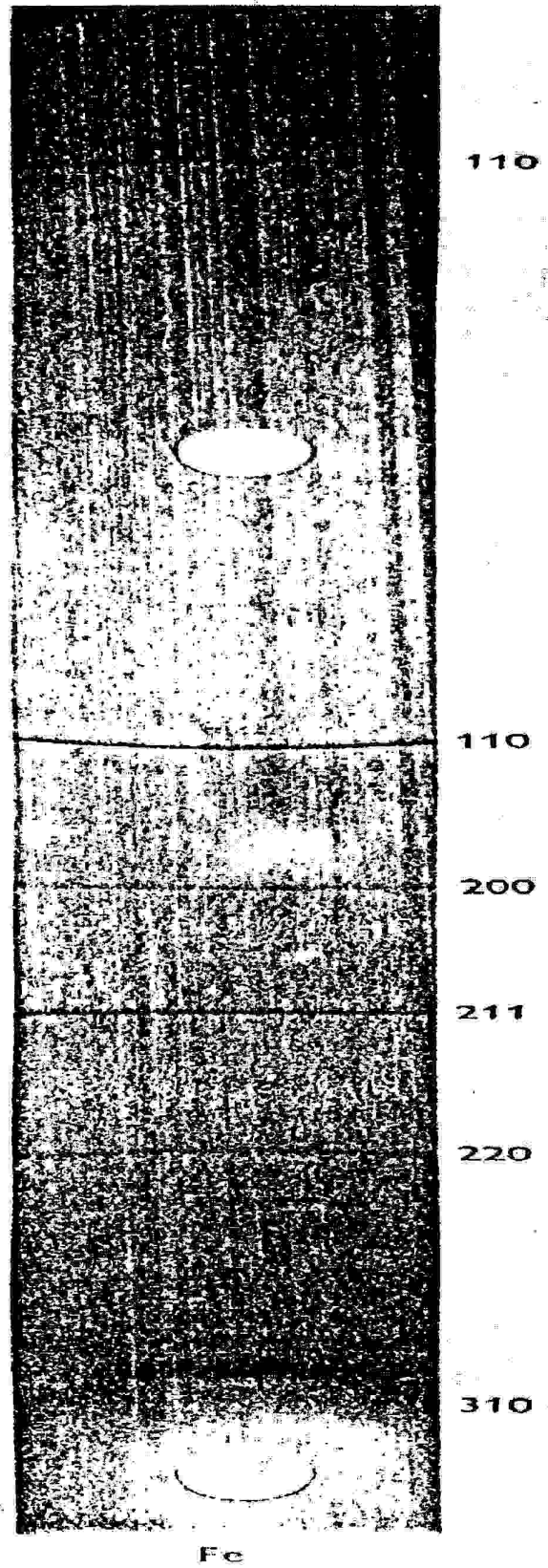
FCC. Austénite (a = 3.598 Å)						
d	h	k	l	I/I ₀	λ _{Co}	λ _{Cu}
2.07762	1	1	1	100	51.01	43.56
1.79900	2	0	0	45.3	59.63	50.75
1.27200	2	2	0	27.5	89.36	74.6
1.08484	3	1	1	42.8	111.08	90.57
1.03865	2	2	2	14.6	118.91	95.84

CC. Ferrite (a = 2.8665 Å) à 20°C						
d	h	k	l	I/I ₀	2θ (Co)	2θ (Cu)
2.0269	1	1	0	100	52.37	44.708
1.4333	2	0	0	14.6	77.22	65.09
1.17028	2	1	1	28.3	99.69	82.43
1.01349	2	2	0	9.7	123.90	99.04
1.90647	3	1	0	28	161.32	116.53

Martensite 1% C. (a = 2.912 Å)						
d	h	k	l	I/I ₀	2θ (Co)	2θ (Cu)
2.5894	1	0	1	98.3157	51.50	43.97
2.01948	1	1	0	46.4843	52.58	44.88
1.42548	0	0	2	8.6596	74.04	65.47
1.42799	2	0	0	15.0514	77.57	65.94
1.196623	1	1	2	15.8746	96.74	80.21
1.02947	2	0	2	9.9393	120.66	96.97
1.00972	2	2	0	4.7496	124.72	99.54
0.935672	1	0	3	87.4079	145.86	110.95
0.906589	3	0	1	8.2698	161.23	116.49

cémentite 1% C. (d = 2.5467Å)		
35.24	6	2.5
37.65	32	16
39.82	38	15.5
40.65	25	14
42.9	25	10
43.76	60	34.5
44.76	70	35
44.57	* 60	32
45.00	100	60
45.88	55	25
48.6	30	18
49.12	40	26

Fig. 3-58. Cliché de diffraction X du Fer



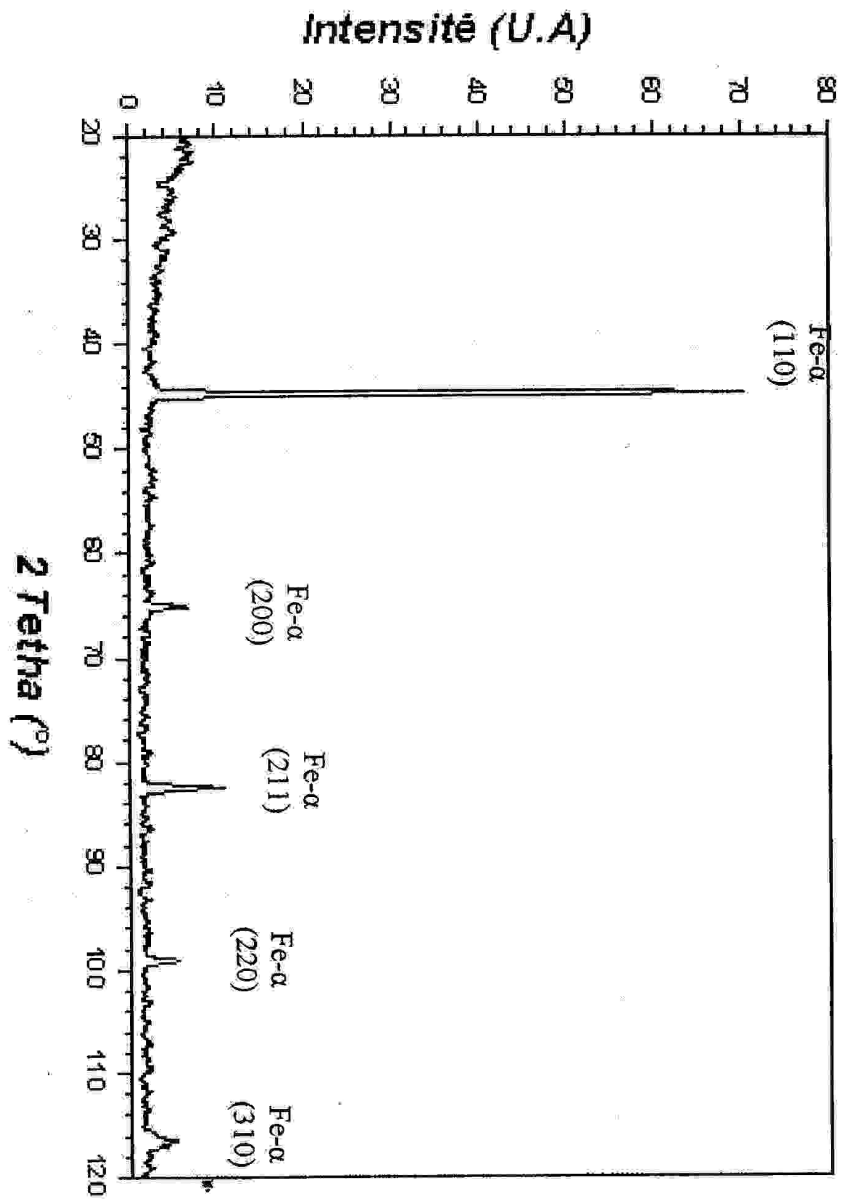


Fig. 3-59 : Echantillon dont le zone de la soudure est affectée par la chaleur Q36

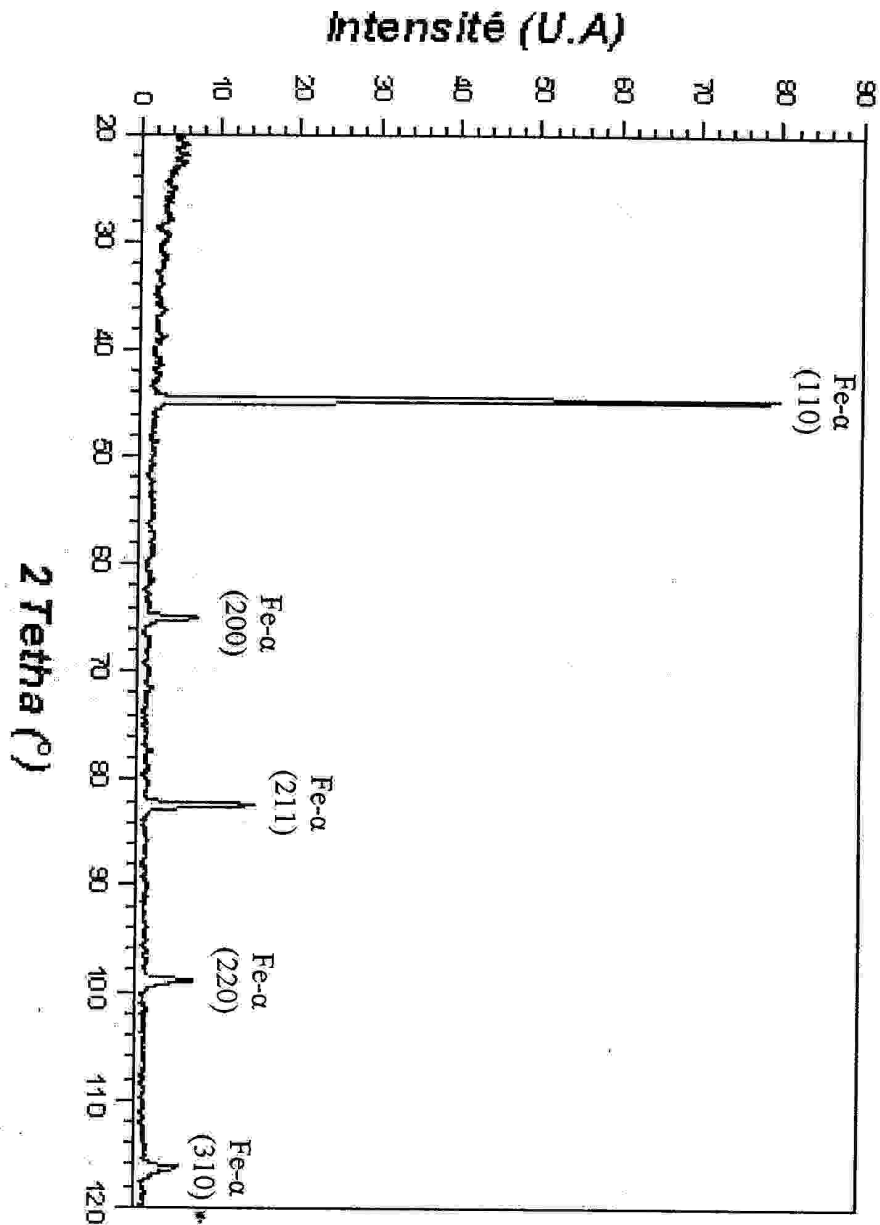


Fig. 3-60 : Métal de base Q36

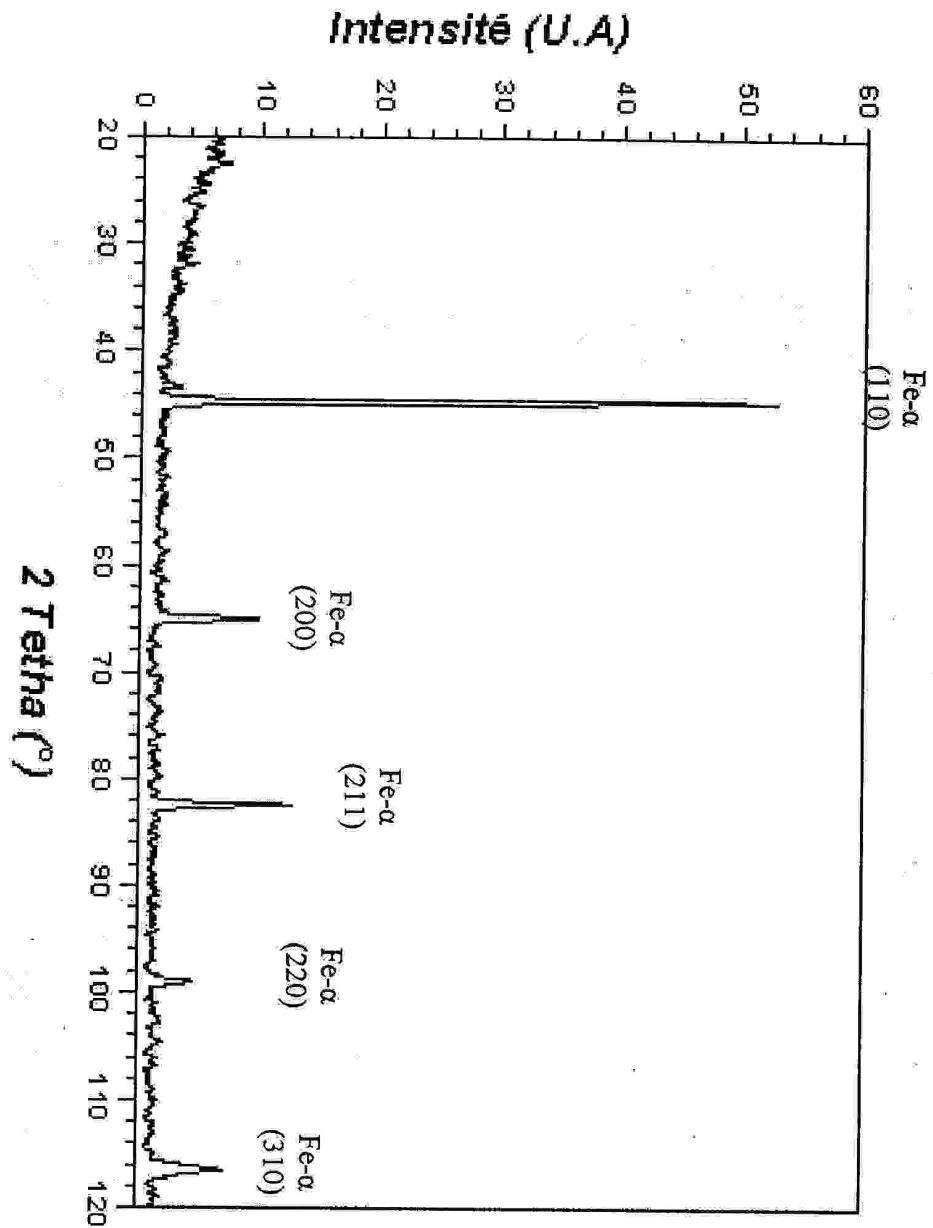


Fig. 3-61 : Zone fondue Q36- SG3

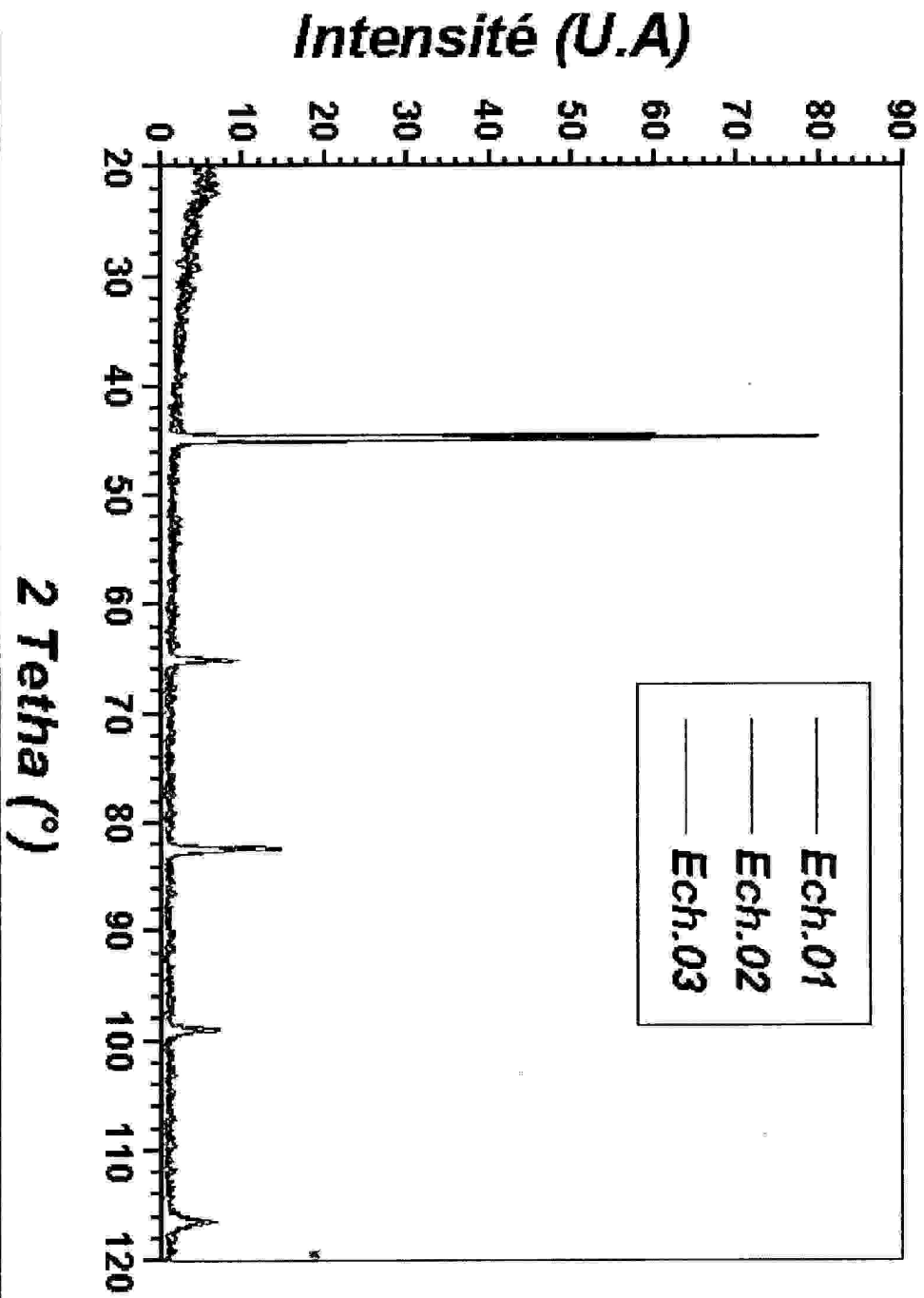


Fig. 3-62. Ech.01 : Métal de base , Ech.02 : Zone affectée , Ech.03 Zone fondue

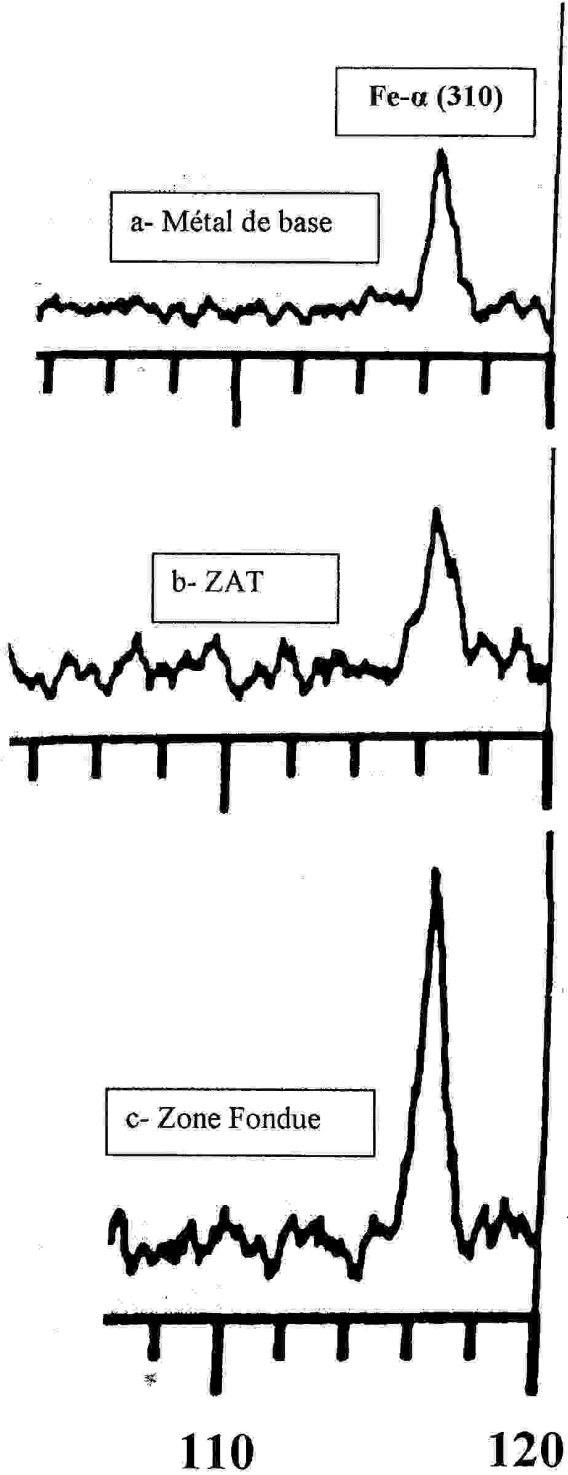
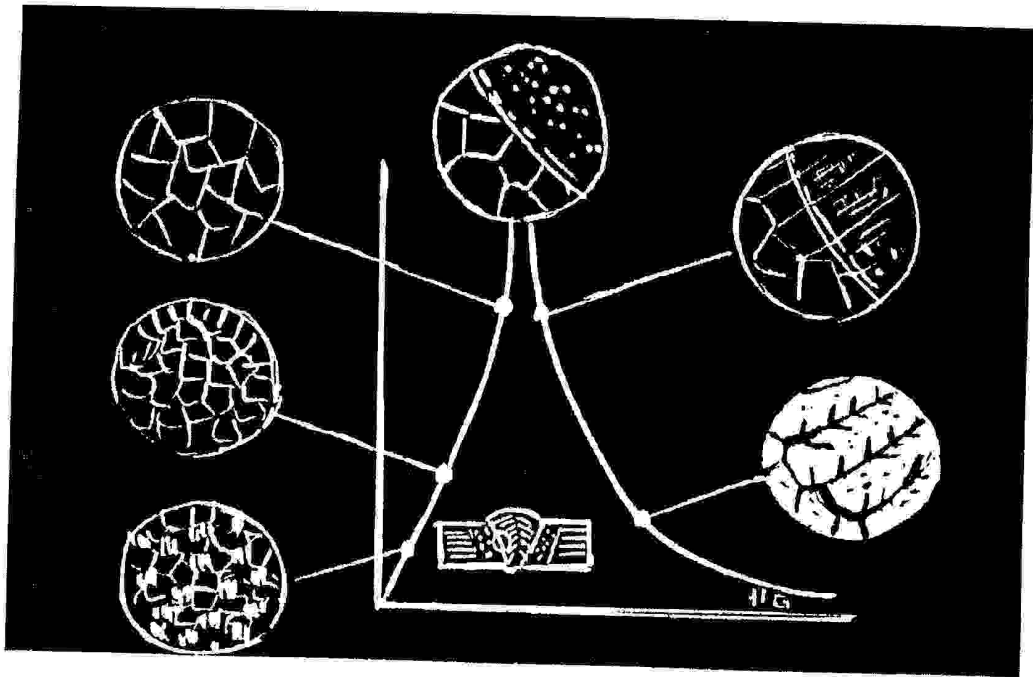


Fig. 3-63. Spectres comparatifs des plans 310 suivant l'état de l'acier

CHAPITRE IV

DISCUSSION DES RESULTATS



IV- DISCUSSION DES RESULTATS :

Au vu des résultats obtenus suite à notre étude menée sur la chimie du soudage et ceci concernant les aciers de constructions mécaniques ; nous pouvons avancer dans ce qui suit une analyse comparative de nos résultats avec celles données dans quelques références bibliographiques ou travaux réalisés au complexe pelles et grues :

-a-Les résultats d'analyses chimiques de *carbométrie* et de *spectrométrie* des diverses nuances étudiées montrent que les pourcentages en éléments –Carbone , Manganèse et silicium sont en respect des normes requises.

-b-Les résultats de micro dureté donnent des profils en total accord à ceux relatifs aux joints soudés ; en effet on remarque que la dureté est élevée dans la zone de liaison ce qui vulgarise l'effet de la surchauffe dans la zone affectée thermiquement. En fait pour les aciers objet de notre étude et qui sont assez proche de la nuance E36 (de la norme Française NF) nous devons éviter les valeurs de micro dureté supérieures à 398 HV₅ car elles pourraient témoigner de la présence de la martensite- ceci n'est pas notre cas. Pour tous les cas obtenus dans notre travail la valeur de 320 HV₅ n'a jamais été dépassée .

Toutefois et pour rendre l'écart des duretés minimum ; un traitement thermique de préchauffage peut être préconisé comme en témoigne la courbe figure.IV-1- ci dessous :

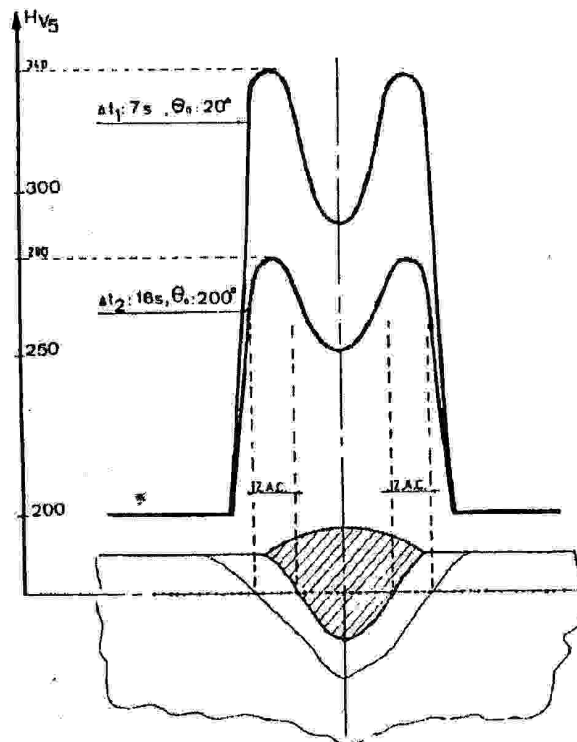


figure.IV-1
Effet de la température de préchauffage sur la dureté d'un joint soudé

-c-L'étude métallographique nous a permis de suivre l'évolution structurale et micro structurale dans les divers joints étudiés des nuances d'acier au carbone manganèse en effet nous avons :

-dans le cas du métal de base :

* Pour l'alliage TQ46 ; celui-ci présente une structure ferrito- perlitique en bandes avec grains écrouis par laminage du à la fabrication des tôles ; en fait les structures en bandes ne sont pas favorables à la déformation à froid et facilitent le développement de la fissuration à l'intérieur de l'acier. IL est possible de diminuer ce type de défaut en adaptant la composition chimique d'une part (teneur du phosphore) et le traitement thermique d'autre part (un refroidissement rapide après laminage diminue l'organisation de la structure en bandes)-La présence de cette structure en bandes est liée à une vitesse de refroidissement trop faible entre l'austénitisation et le maintien isotherme. [23]

*Pour l'alliage Q36 ; la structure en polygones irréguliers montre que nous avons une matrice ferritique . Toutefois l'aspect des grains montre aussi que cette structure est écrouie.

*Le Naxtra ; présente un aspect structural semblable a celui de la bainite ce qui signifie que les tôles ont été traités après laminage.

-dans le cas du métal d'apport(Zone fondue) :

Dans tous les cas de figure nous obtenons une structure à caractère orienté résultant du mécanisme de solidification d'un liquide (le SG3) sur le métal de base.

Dans ce cas, la continuité métallique est assurée par le phénomène dit d'épitaxie, selon lequel les cristaux de solidification adoptent, en prenant naissance à l'interface , l'orientation des cristaux du métal solide -croissance sélective- [24]

Dans le cas de nos échantillons la phase que nous observons est du type bainitique.

Nous avons donc une solidification caractérisée par une direction privilégiée de croissance ; ce cas rend compte d'une situation où le soudage a été rapide.

Dans cette zone la taille des grains est contrôlée -entre autre -par la taille des grains austénitiques du métal de base et par la vitesse de soudage.

En fait nous observons une zone basaltique dont la structure conduit à la présence :

**De ferrite proeutectoïde aux joints de grains .Le bore favorise la formation de la ferrite proeutectoïde.

**De bainite en lattes (sapine-tablettes) à cœur des grains.

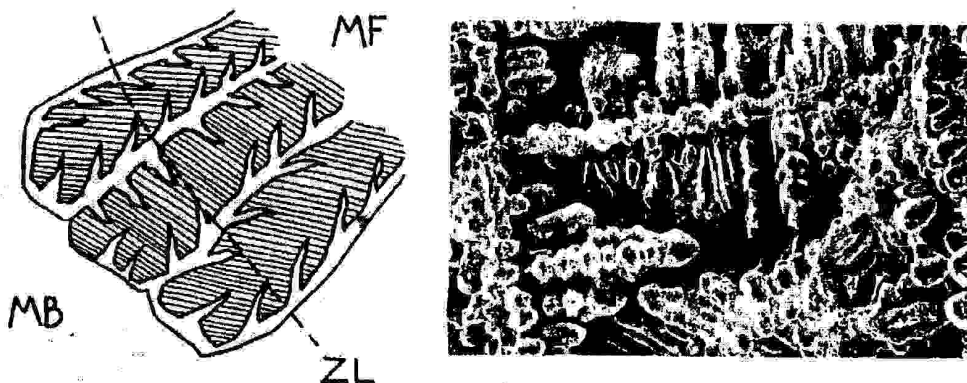


figure.IV-2
Phénomène de solidification orientée

-La zone affectée thermiquement du métal de base :

Lors du chauffage, une transformation rapide, complète en quelques dixièmes de secondes, de la ferrite en austénite, accompagnée d'une remise en solution des précipités, complète dans la zone à gros grains, partielle dans la zone recristallisée. On observe également une remise en solution des précipités.

En fait le phénomène redouté dans cette zone est le phénomène de surchauffe; c'est le phénomène ultime avant la fusion. La surchauffe suit immédiatement dans l'échelle des températures, la recristallisation et le grossissement modéré des grains. On constate en effet, à partir d'une température θ_s , que certains grains disparaissent au bénéfice des autres, qui grossissent d'autant, de sorte qu'au dessus d'une deuxième température, on ne trouve plus que de gros grains.

La dimension du grain de surchauffe est fonction de la température et du temps de maintien à cette température (*figure.IV-2*), ainsi que le degré d'écroûissage initial. De plus, certaines inclusions sont susceptibles de limiter la surchauffe en freinant le déplacement des joints de grains.

Quand aux conséquences de la surchauffe en soudage, elles sont d'ordre métallurgique et mécanique. Au point de vue métallurgique, une première conséquence est, à la faveur de l'épitaixie lors de la solidification, l'influence de la grosseur de des grains de surchauffe, à travers la zone de liaison, sur celle des grains de la zone fondue.

Sur le plan mécanique, l'influence fragilisante est évidente, d'une part en raison du réseau cubique centré de la ferrite, d'autre part parce que les joints de grains moins abondants, jouent un moindre rôle en tant qu'obstacles à la propagation de cassures.

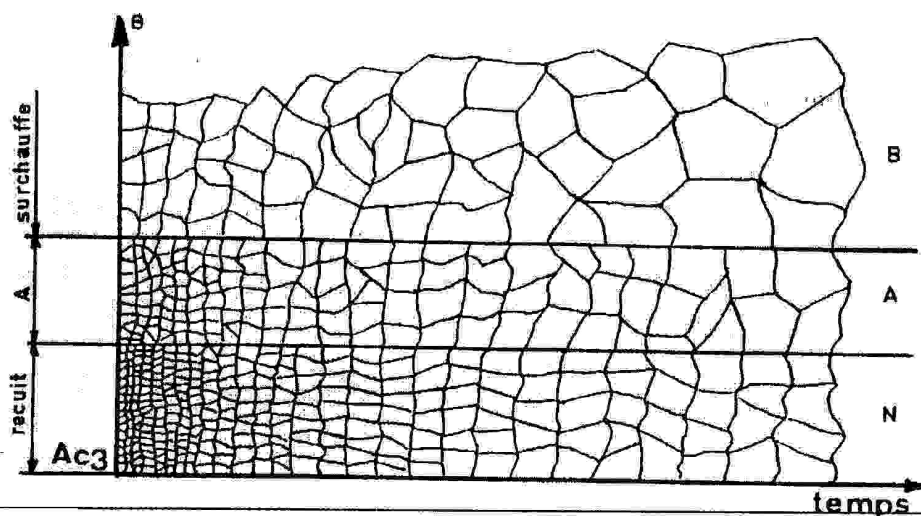


figure.IV-3 Grossissement des grains d'austénite en fonction du temps de chauffage : zone N, recuit normalisé ; zone A, léger grossissement ; zone B : grains dégénérés par la surchauffe.

En fait et selon les travaux de références des documents de l'institut de soudure les états d'aciers doux-écroui se présentent comme suit :

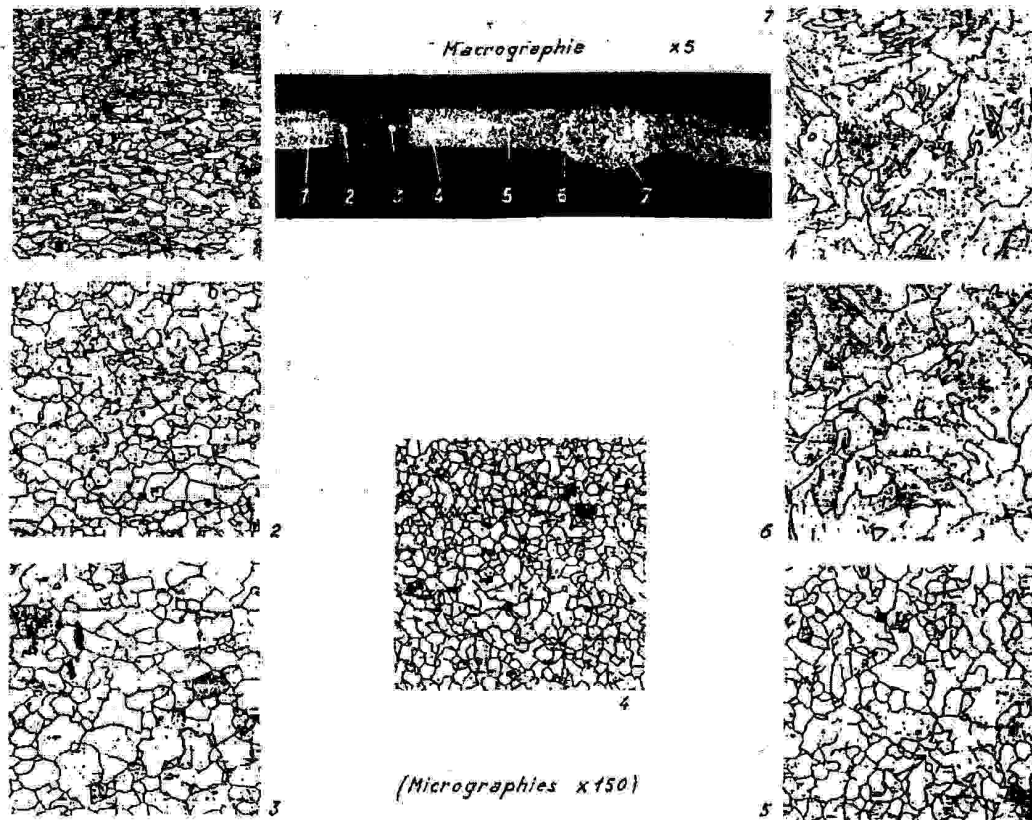
-A-Sur le plan macrographique :

-METAL DE BASE
-RECRISTALLISATION ET SURCHAUFFE DE LA FERRITE
-REGENERATION THERMIQUE
-ZONE DE SURCHAUFFE
-ZONE FONDUE

-B-Sur le plan micrographique :

-GRAINS DE FERRITE ORIENTES PAR ECROUISSAGE-EFFET DU LAMINAGE-
-FERRITE RECRISTALLISEE-DISPARITION DE GRAINS ECROUIS
-GROSSISSEMENT DU GRAIN FERRITIQUE APRES RECRISTALLISATION
-REGENERATION THERMIQUE PAR TRANSFORMATION DE LA FERRITE EN AUSTENITE A L'ECHAUFFEMENT ET TRNSFORMATION INVERSE AU REFROIDISSEMENT
-GROSSISSEMENT BANAL DE L'AUSTENITE A 'ECHAUFFEMENT
-STRUCTURE DE SURCHAUFFE
-STRUCTURE BRUTE DE SOLIDIFICATION DE LA ZONE FONDUE

L'ensemble de s points cités ci-dessus sont clarifiés sur les macro-mictographies en figures *IV-4*



- GRAINS DE FERRITE ORIENTES PAR ECROUISSAGE-EFFET DU LAMINAGE-
- FERRITE RECRISTALLISEE-DISPARITION DE GRAINS ECROUIS
- GROSSISSEMENT DU GRAIN FERRITIQUE APRES RECRISTALLISATION
- REGENERATION THERMIQUE PAR TRANSFORMATION DE LA FERRITE EN AUSTENITE A L'ECHAUFFEMENT ET TRNSFORMATION INVERSE AU REFROIDISSEMENT
- GROSSISSEMENT BANAL DE L'AUSTENITE A 'ECHAUFFEMENT
- STRUCTURE DE SURCHAUFFE
- STRUCTURE BRUTE DE SOLIDIFICATION DE LA ZONE FONDUE

Figures. IV-4

Problème des gaz

Le processus de la solidification du métal fondu des soudures détermine l'évolution des gaz et vapeurs qu'il peut contenir, évolution qui se manifeste par des soufflures qui n'ont pas la possibilité de quitter le bain de fusion avant d'être emprisonnés dans le métal solidifié. Les gaz ou vapeurs en question peuvent provenir d'influence extérieures à l'opération de soudage elle-même ou bien du comportement du bain de fusion.

*Dans la première catégorie, on peut mentionner la décomposition de la combustion des enduits, peintures ou revêtement divers, la réduction de la calamine des produits laminés, l'effet de l'humidité ou tout simplement l'effet de l'air emprisonné lors de soudures malencontreusement préparés ou mal exécutés.

*Comme exemple de la deuxième catégorie on peut citer les effets de la volatilisation des éléments (cas du Zinc des laitons), de l'humidité contenue ou absorbée par les produits d'apport (dégagement d'hydrogène) et par les réactions d'effervescence (dégagement de monoxyde de carbone).

Problème de fragilisation par l'hydrogène ::

La fragilisation par l'hydrogène résulte de l'interaction de l'hydrogène avec l'acier et qui provoque l'altération de ses caractéristiques mécaniques. Les dommages créés par cet hydrogène peuvent prendre différentes formes :

- *1-Déformation plastique, se traduisant par une baisse de la contrainte à rupture,
- *2-Chute de ductilité, en général due à une sursaturation du matériau en hydrogène,
- *3-Dégradation des produits d'écoulement,
- *4-Fissuration interne,
- *5-Rupture différée (prématurée),
- *6-formation de phases fragiles -Formation des hydrures-,
- *7-Attaque par l'hydrogène -réaction avec le Carbone-.

Un bon exemple sur les effets de l'hydrogène est représenté en figure IV-5

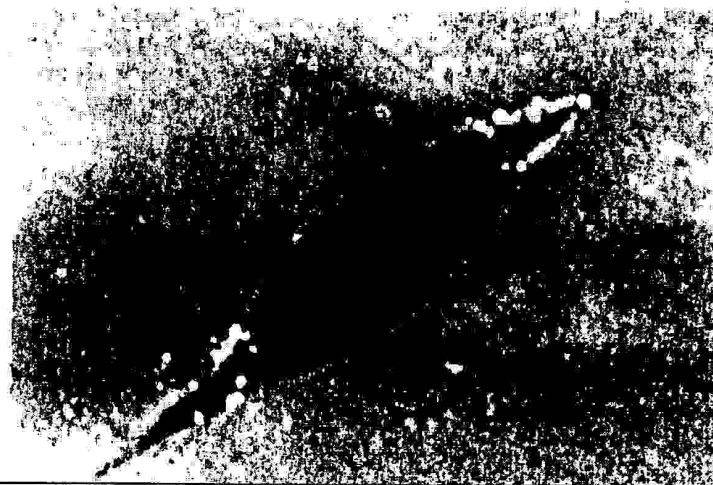


Figure IV-5.
Ségrégation de l'hydrogène aux interfaces d'inclusions de sulfures de fer (particule du centre-MnS)[25]

Conclusions

Notre étude du joint soudé basée sur les analyses chimiques, les observations métallographiques, rayons x et la caractérisation par micro dureté nous a permis de clarifier les points essentiels ;

-Hétérogénéité de la structure dans le joint soudé regroupant pour le TQ46
**un métal de base de structure en bandes ferrito-perlitique,*
**une zone affectée thermiquement de structure surchauffée a gros grains,*
**une zone fondue de structure héritée à partir de la Z.A.T. avec solidification orientée.*

-La jonction effectuée avec le NAXTRA semble plus homogène.

-Une dureté non uniforme présentant des pics aux alentours de la zone fondue,

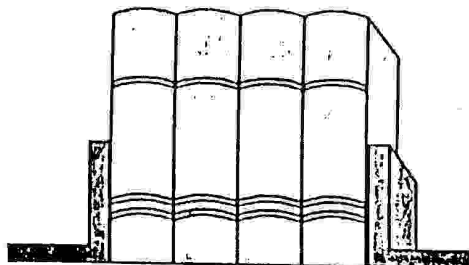
-L'effet des gaz qui par leur présence en bain de fusion provoquent la formation des soufflures . Ces derniers altèrent la compacité du joint soudé et initient la présence de micro fissures dans la structure.

Ainsi l'ingénieur soudeur se trouve confronté à deux problèmes essentiels :

-la non altération du métal de base par un chauffage excessif (surchauffe) ce qui entraînerai la dégradation de l'ensemble soudé.

-La recherche d'une protection du bain de fusion contre l'atmosphère environnante,

BIBLIOGRAPHIE

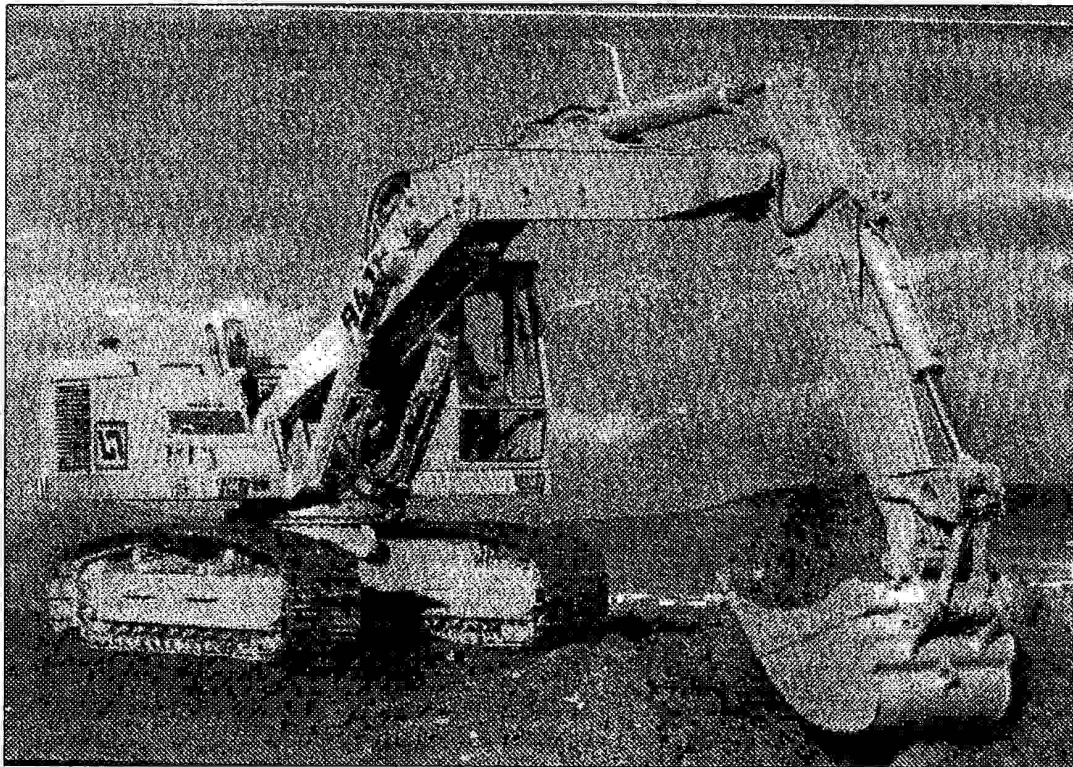


BIBLIOGRAPHIE

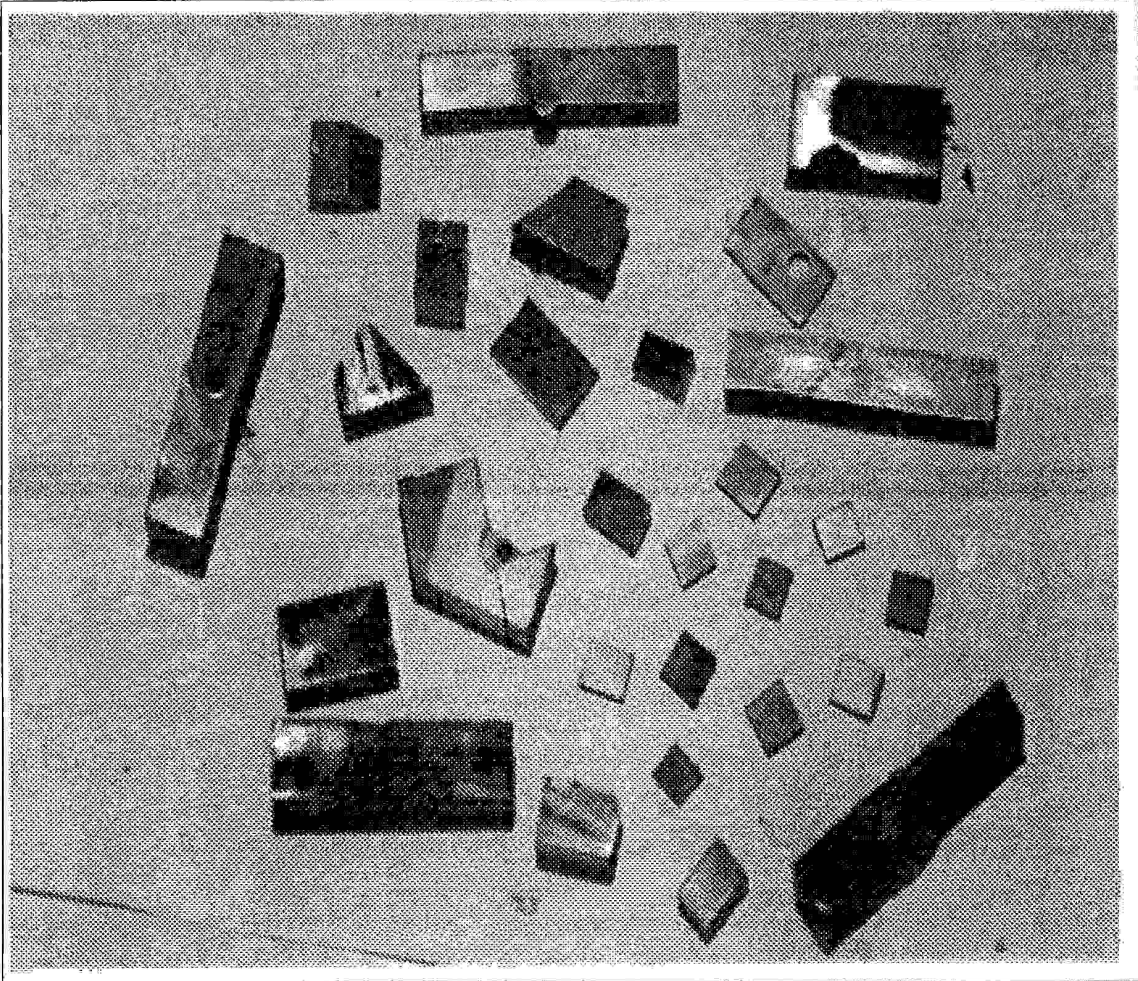
- [1] Guide Technique de C.P.G et document de l'institut de soudure (I.S).
- [2] PENDRE J.A. " le soudage " , CHENELIERE / Me GrawHill , Edition française, 1977 .
- [3] Le GOUIC R. " precis de soudage ; Brasage " , Eyralles 3^{ème} Edition , 1982 .
- [4] BANISSAD S " le soudage Tec 340" , OPU , 1992.
- [5] Technique de l'ingénieur , volume M₃ .
- [6] Métaux et Alliages , Tome 2 , Edition masson et Cie, 1971 .
- [7] OLGA KENNARD et Cie : molecular structures and dimentions , interatomic , distances , organic and organo metallic , Cristal structures , Edition N.V.A.O sthocks, Utrecht , 1972.
- [8] G. HENRY .G.SAINZ.G BERNARGER : le livre de l'aciers, Editions Tec et DOC .1994.
- [9] BORG R.J and DIENCS G.J . " the physical chemistry of solids " , Academic Press.Inc, 1992 .
- [10] ASHBY M.F. JONES D.R.H , " Matériaux " Tome II , Dunod, 1991.
- [11] BERANEER G , HENRY G et LABBE G , les Aciers spéciaux lavoisier Tec et DOC , 1999 .
- [12] "Encyclopedia Universalis " Volume 1 .
- [13] " Encyclopedia de sciences industrielle " Quillet Mécanique Générales , Applications , volume M1.
- [14] FRANCHAN J.L. "Guides des sciences et technologies industrielle" AFNOR et NATHAN , 1998 .
- [15] PAMEY G . " propriétés des alliages , M_{2II} " Techniques de l'ingénieur , 1996.
- [16] CHAUSIN C .et HILLY G " Métallurgie (Tome 1 : Alliages métallique) " , Dunod ; 2^{ème} édition .1976.
- [17] LAKHTINE I ." Métallographie et traitements thermiques des métaux " , mir , 1986 .
- [18] LIGNON .J et Maillebeau R ." étude des matériaux I , métaux ferreux " , Delagrave , 1983.
- [19] Document " CPG " , Constantine .
- [20] R . VARISELLAZ . Soudage élément de conception et de réalisation : édition Dunod .1982.
- [21] BOUMAZA .A , ZEDIRA H et Lakhdari.L " Etude micrographique et Fractographique par M.E.B.d'une jonction soudée en Acier au C.Mn " Accepter au Séminaire International sur la Microscopie SIM 1 , Sidi belAbès, octobre 2002 .
- [22] BARRALIS .J. et MOIDER G ." précis de Métallurgie : structures – propriétés et Normalisation " AFNOR et NATHAN , 5^{ème} édition .

- [23] G. BERANGER , G HENRY , GLABBE ,L SOULIGNAC les aciers spéciaux ; édition . lavoisier TEC et DOC 1997.
- [24] H.GRANJON . Bases métallurgiques du soudage ; publications du soudage et de ses applications IS (institut de soudure) 1995.
- [25] J.PHILIBERT , A.VIGNES ,Y BRECHET , P.COMBARDE , Métallurgie du minerai au matériaux . édition MASSON . PARIS , 1998 .

ANNEXES



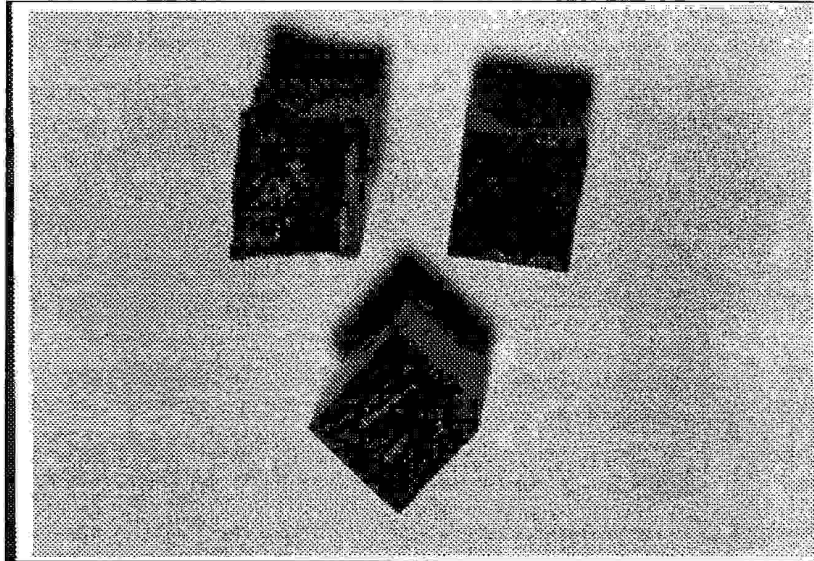
Pelle9411 fabriquée au CPG
Structure mécanique en acier
Structure objet de notre étude



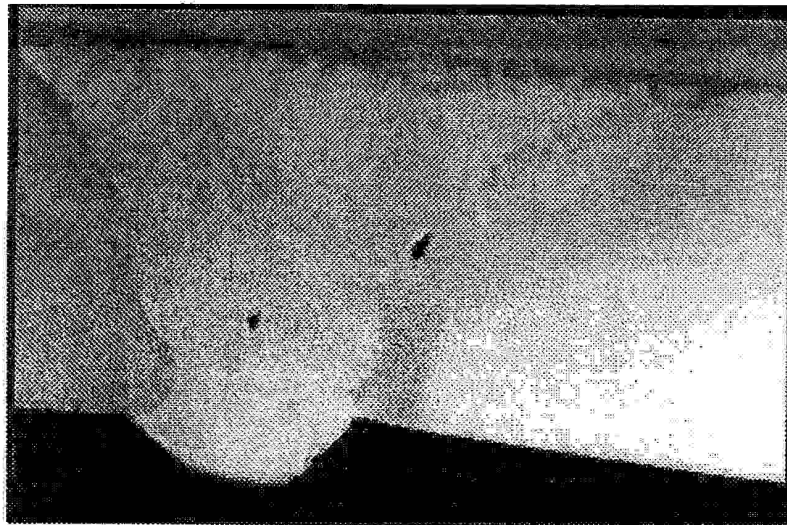
**Différents échantillons soudés utilisés lors
des analyses et observations**



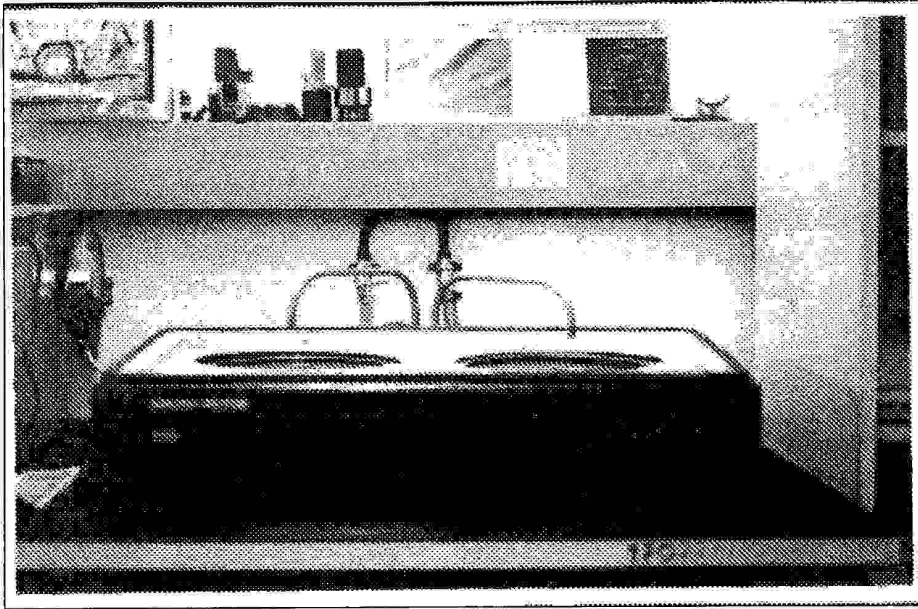
Microbalance



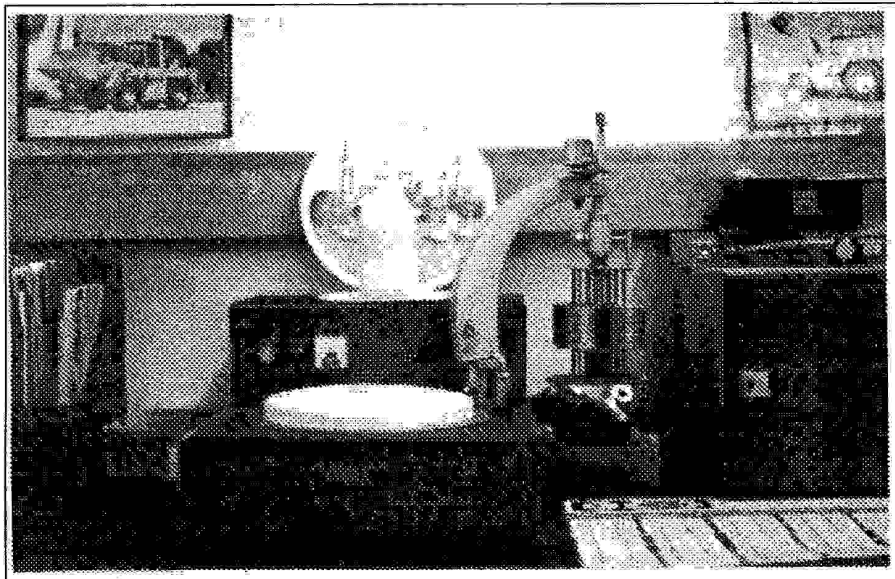
Echantillons cassés-aspect de la surface de cassure



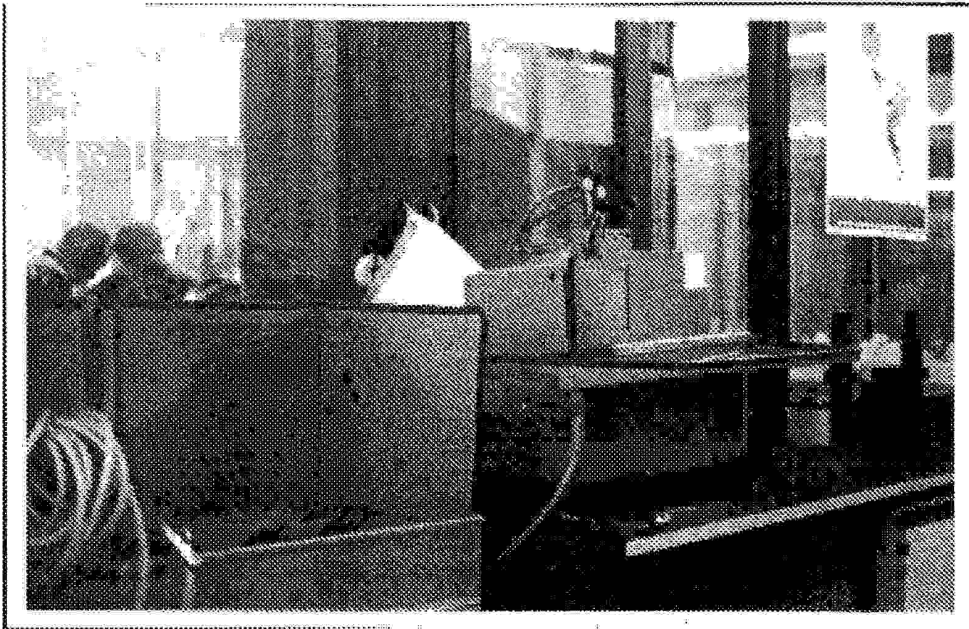
Défaut de soudure dans un joint soudé en acier



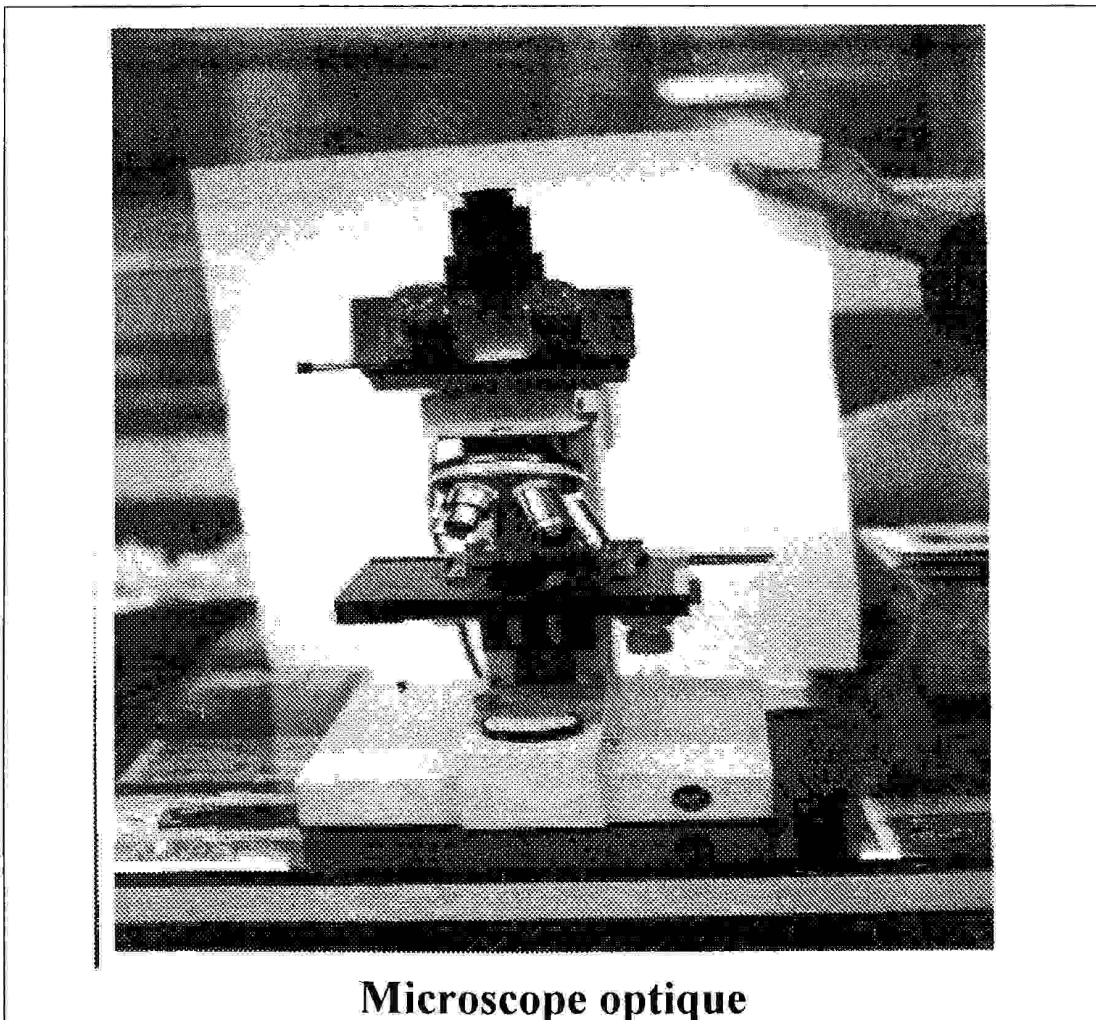
Polisseuse mécanique bi plateaux



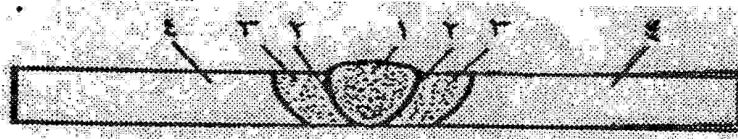
**Polisseuse mécanique-
monoplatau-
drap-feutre mouillé-
pate diamantée.**



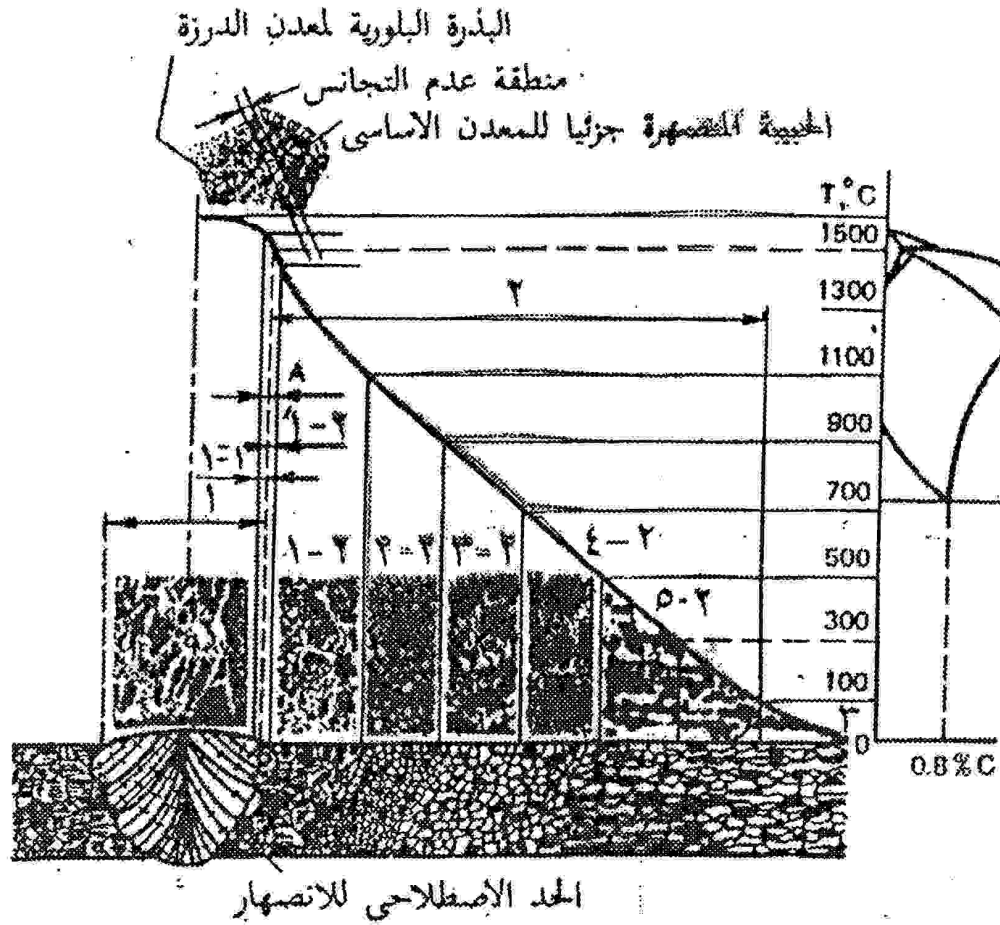
Surfaceuse -Franconneuse à disques



Microscope optique



- مناطق الوصلة اللحامية
- 1- معدن الدرزة
 - 2- منطقة الاندماج بالصهر
 - 3- منطقة التأثير الحراري
 - 4- المعدن الاساسي



مخطط بنية الوصلة التناكبية المنفذة بواسطة اللحام القوسي للفلوآذ المنخفض الكربون خلال شوط واحد :

- 1- عرض معدن الدرزة
 - 1-1 الأقسام المجهرية للتداخل الشديد لمعدن الدرزة
 - 2-1 شدة تداخل منطقة التأثير
 - A- منطقة الاندماج بالصهر (عدم التجانس)
- 2- منطقة التأثير الحراري
 - 1-2 قسم الإحماء المفرط
 - 2-2 قسم التبلور الكامل
 - 3-2 قسم التبلور الغير الكامل
 - 4-2 قسم إعادة التبلور
 - 5-2 قسم التعتيق
- 3- المعدن الأساسي

Ein- druck- diag- nale d in μ = 0,001 mm	Vickershärte in kg/mm ²									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
36	715	711	708	704	700	695	692	688	685	681
37	677	674	670	666	663	659	656	652	649	646
38	642	639	635	632	629	626	622	619	616	613
39	610	606	603	600	597	594	591	588	585	582
40	580	577	574	571	568	565	563	560	557	554
41	552	549	546	544	541	538	536	533	531	528
42	526	523	521	518	516	513	511	509	506	504
43	501	499	497	495	492	490	488	486	483	481
44	479	477	475	472	470	468	466	464	462	460
45	458	456	454	452	450	448	446	444	442	440
46	438	436	434	433	431	429	427	425	423	422
47	420	418	416	414	413	411	409	408	406	404
48	402	401	399	397	396	394	393	391	389	388
49	386	385	383	381	380	378	377	375	374	372
50	371	369	368	366	365	364	362	361	359	358
51	356	355	354	352	351	350	348	347	346	344
52	343	342	340	339	338	336	335	334	333	331
53	330	329	328	326	325	324	323	322	320	319
54	318	317	316	314	313	312	311	310	309	308
55	307	305	304	303	302	301	300	299	298	297
56	296	295	294	293	291	290	289	288	287	286
57	285	284	283	282	281	280	279	278	278	277
58	276	275	274	273	272	271	270	269	268	267
59	266	265	265	264	263	262	261	260	259	258
60	258	257	256	255	254	253	252	252	251	250
61	249	248	248	247	246	245	244	244	243	242
62	241	240	240	239	238	237	237	236	235	234
63	234	233	232	231	231	230	229	229	228	227
64	226	226	225	224	224	223	222	221	221	220
65	219	219	218	217	217	216	215	215	214	214
66	213	212	212	211	210	210	209	208	208	207
67	207	206	205	205	204	204	203	202	202	201
68	201	200	199	199	198	198	197	197	196	195
69	195	194	194	193	193	192	191	191	190	190
70	189	189	188	188	187	187	186	186	185	185
71	184	183	183	182	182	181	181	180	180	179
72	179	178	178	177	177	176	176	175	175	175
73	174	174	173	173	172	172	171	171	170	170
74	169	169	168	168	168	167	167	166	166	165
75	165	164	164	164	163	163	162	162	161	161
76	161	160	160	159	159	158	158	157	157	157
77	156	156	156	155	155	154	154	153	153	153
78	152	152	152	151	151	151	150	150	149	149
79	149	148	148	147	147	147	146	146	146	145
80	145	145	144	144	143	143	143	142	142	142

Ein- druck- diag- nale d in μ = 0,001 mm	Vickershärte in kg/mm ²									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
81	141	141	141	140	140	140	139	139	139	138
82	138	138	137	137	137	136	136	136	135	135
83	135	134	134	134	133	133	133	132	132	132
84	131	131	131	131	130	130	130	129	129	129
85	128	128	128	127	127	127	127	126	126	126
86	125	125	125	125	124	124	124	123	123	123
87	123	122	122	122	121	121	121	121	120	120
88	120	120	119	119	119	119	118	118	118	117
89	117	117	117	116	116	116	116	116	115	115
90	115	114	114	114	114	113	113	113	113	112
91	112	112	112	111	111	111	111	110	110	110
92	110	109	109	109	109	108	108	108	108	107
93	107	107	107	107	106	106	106	106	105	105
94	105	105	105	104	104	104	104	104	103	103
95	103	103	102	102	102	102	102	101	101	101
96	101	100	100	100	100	100	99,4	99,2	99,0	98,7
97	98,5	98,3	98,1	97,9	97,7	97,5	97,3	97,1	96,9	96,7
98	96,5	96,3	96,2	96,0	95,8	95,6	95,4	95,2	95,0	94,8
99	94,6	94,4	94,2	94,0	93,8	93,7	93,5	93,3	93,1	92,9
100	92,7	92,5	92,4	92,2	92,0	91,8	91,6	91,4	91,3	91,1
101	90,9	90,7	90,5	90,4	90,2	90,0	89,8	89,6	89,5	89,3
102	89,1	88,9	88,8	88,6	88,4	88,3	88,1	87,9	87,7	87,6
103	87,4	87,2	87,1	86,9	86,7	86,6	86,4	86,2	86,1	85,9
104	85,7	85,6	85,4	85,2	85,1	84,9	84,7	84,6	84,4	84,3
105	84,1	83,9	83,8	83,6	83,5	83,3	83,1	83,0	82,8	82,7
106	82,5	82,4	82,2	82,1	81,9	81,7	81,6	81,4	81,3	81,1
107	81,0	80,8	80,7	80,5	80,4	80,2	80,1	79,9	79,8	79,6
108	79,3	79,3	79,2	79,1	78,9	78,8	78,6	78,5	78,3	78,2
109	78,0	77,9	77,8	77,6	77,5	77,3	77,2	77,0	76,9	76,8
110	76,6	76,5	76,4	76,2	76,1	75,9	75,8	75,7	75,5	75,4
111	75,3	75,1	75,0	74,8	74,7	74,6	74,4	74,3	74,2	74,0
112	73,9	73,7	73,7	73,5	73,4	73,3	73,1	73,0	72,9	72,7
113	72,6	72,5	72,4	72,2	72,1	72,0	71,8	71,7	71,6	71,5
114	71,3	71,2	71,1	71,0	70,8	70,7	70,6	70,5	70,4	70,2
115	70,1	70,0	69,9	69,7	69,6	69,5	69,4	69,3	69,1	69,0
116	68,9	68,8	68,7	68,5	68,4	68,3	68,2	68,1	68,0	67,8
117	67,7	67,6	67,5	67,4	67,3	67,2	67,0	66,9	66,8	66,7
118	66,6	66,5	66,4	66,3	66,1	66,0	65,9	65,8	65,7	65,6
119	65,5	65,4	65,3	65,1	65,0	64,9	64,8	64,7	64,6	64,5
120	64,4	64,3	64,2	64,1	64,0	63,9	63,7	63,6	63,5	63,4
121	63,3	63,2	63,1	63,0	62,9	62,8	62,7	62,6	62,5	62,4
122	62,3	62,2	62,1	62,0	61,9	61,8	61,7	61,6	61,5	61,4
123	61,3	61,2	61,1	61,0	60,9	60,8	60,7	60,6	60,5	60,4
124	60,3	60,2	60,1	60,0	59,9	59,8	59,7	59,6	59,5	59,4
125	59,3	59,2	59,2	59,1	59,0	58,9	58,8	58,7	58,6	58,5

Ein- druck- diag- nale d in μ = 0,001 mm	Vickershärte in kg/mm ²									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
126	58,4	58,3	58,2	58,1	58,0	57,9	57,9	57,8	57,7	57,6
127	57,5	57,4	57,3	57,2	57,1	57,0	56,9	56,8	56,8	56,7
128	56,6	56,5	56,4	56,3	56,2	56,1	56,0	55,9	55,8	55,8
129	55,7	55,6	55,5	55,5	55,4	55,3	55,2	55,1	55,0	54,9
130	54,9	54,8	54,7	54,6	54,5	54,4	54,3	54,2	54,1	54,1
131	54,0	53,9	53,9	53,8	53,7	53,6	53,5	53,4	53,3	53,3
132	53,2	53,1	53,1	53,0	52,9	52,8	52,7	52,6	52,5	52,5
133	52,4	52,3	52,3	52,2	52,1	52,0	51,9	51,8	51,7	51,7
134	51,6	51,6	51,5	51,4	51,3	51,2	51,1	51,0	51,0	51,0
135	50,9	50,8	50,7	50,6	50,6	50,5	50,4	50,4	50,3	50,2
136	50,1	50,1	50,0	49,9	49,8	49,8	49,7	49,6	49,5	49,5
137	49,4	49,3	49,3	49,2	49,1	49,0	48,9	48,8	48,8	48,8
138	48,7	48,6	48,5	48,5	48,4	48,3	48,2	48,1	48,1	48,1
139	48,0	47,9	47,9	47,8	47,7	47,6	47,5	47,4	47,4	47,4
140	47,3	47,2	47,2	47,1	47,0	46,9	46,8	46,8	46,7	46,7
141	46,6	46,6	46,5	46,4	46,4	46,3	46,2	46,1	46,0	46,0
142	46,0	45,9	45,9	45,8	45,7	45,6	45,5	45,5	45,4	45,4
143	45,3	45,3	45,2	45,2	45,1	45,0	44,9	44,8	44,8	44,8
144	44,7	44,7	44,6	44,5	44,5	44,4	44,3	44,2	44,2	44,2
145	44,1	44,0	44,0	43,9	43,9	43,8	43,7	43,6	43,6	43,6
146	43,5	43,4	43,4	43,3	43,3	43,2	43,1	43,1	43,0	43,0
147	42,9	42,8	42,8	42,7	42,7	42,6	42,5	42,4	42,4	42,4
148	42,3	42,3	42,2	42,2	42,1	42,0	41,9	41,9	41,8	41,8
149	41,8	41,7	41,7	41,6	41,5	41,4	41,4	41,3	41,3	41,3
150	41,2	41,2	41,1	41,0	41,0	40,9	40,8	40,8	40,7	40,7
151	40,7	40,6	40,6	40,5	40,5	40,4	40,3	40,2	40,2	40,2
152	40,1	40,1	40,0	40,0	39,9	39,9	39,8	39,7	39,7	39,7
153	39,6	39,6	39,5	39,5	39,4	39,4	39,3	39,2	39,2	39,1
154	39,1	39,0	39,0	38,9	38,9	38,8	38,8	38,7	38,6	38,6
155	38,6	38,5	38,5	38,4	38,4	38,3	38,3	38,2	38,2	38,1
156	38,1	38,1	38,0	38,0	37,9	37,9	37,8	37,7	37,7	3

Handwritten notes: "Drehen HV" with an arrow pointing to the table.

Zugfestigkeit N/mm ²	Vickers härte (F ≥ 98 N)	Brinell- härte ¹⁾ (F = 30 N)	Rockwellhärte								
			HRC	HRE	HRC	HRA	HRD 1)	HR 15N	HR 30N	HR 45N	
255	80	78.0									
270	85	80.7	41.0								
285	90	83.5	48.0	92.8							
305	95	86.2	52.0								
320	100	89.0	58.2	87.0							
335	105	91.8									
350	110	94.5	82.3	90.8							
370	115	97.2									
385	120	100.0	88.7	93.8							
400	125	102.7									
418	130	105.5	71.2	96.4							
430	135	108.2									
460	140	111.0	75.0	99.0							
485	145	113.7									
480	150	116.5	78.7	101.4							
495	155	119.2									
510	160	122.0	81.7	103.8							
532	165	124.7									
545	170	127.5	85.0	105.5							
560	175	130.2									
575	180	133.0	87.1	107.2							
595	185	135.7									
610	190	138.5	89.5	108.7							
625	195	141.2									
640	200	144.0	91.8	110.1							
660	205	146.7									
675	210	149.5	92.5	111.3							
680	215	152.2									
705	220	155.0	94.0	112.4							
720	225	157.7	96.0								
740	230	160.5	96.7	113.4							
758	235	163.2									
770	240	166.0	98.1	114.3	20.3	60.7	40.3	98.8	41.7	18.0	
785	245	168.7			21.3	61.2	41.1	70.1	42.5	21.1	
800	250	171.5	99.5	115.1	22.2	61.8	41.7	70.6	43.4	22.2	
820	255	174.2			23.1	62.0	42.2	71.1	44.2	23.2	
835	260	177.0	(101)		24.0	62.4	42.1	71.6	45.0	24.3	
850	265	179.7			24.8	62.7	43.7	72.1	45.7	25.2	
865	270	182.5	(102)		25.6	63.1	44.3	72.6	46.4	26.2	
880	275	185.2			26.4	63.5	44.9	73.0	47.2	27.1	
900	280	188.0	(104)		27.1	63.8	45.3	73.4	47.8	27.9	
915	285	190.7			27.9	64.2	46.0	73.8	48.4	28.7	
930	290	193.5	(105)		28.5	64.5	46.5	74.2	49.0	29.5	
950	295	196.2			29.2	64.8	47.1	74.6	49.7	30.4	
965	300	199.0			29.8	65.2	47.5	74.9	50.2	31.1	
985	310	204.5			31.0	65.8	48.4	75.8	51.3	32.3	
1020	320	211.0			32.2	66.4	49.4	76.2	52.3	33.8	
1060	330	217.5			33.3	67.0	50.7	76.8	53.8	35.2	
1095	340	224.0			34.4	67.8	51.1	77.4	54.4	36.6	
1125	350	230.5			35.5	68.1	51.9	78.0	55.4	37.8	

Die eingeklammerten Zahlen sind Härtewerte, die außerhalb des Definitionsbereichs des genannten Härteprüfverfahren liegen, praktisch jedoch vielfach als Näherungswerte benutzt werden.
 1) Siehe Seite 1
 *) Errechnet aus HB = 0,95 · HV

Zugfestigkeit N/mm ²	Vickers härte (F ≥ 98 N)	Stoß- härte ¹⁾ (KV ₁₀₀)	Rockwellhärte								
			HRC	HRE	HRC	HRA	HRD 1)	HR 15N	HR 30N	HR 45N	
1125	380	342			36.8	68.7	52.8	78.8	58.4	31.1	
1150	370	352			37.7	69.2	53.8	79.2	57.4	30.4	
1220	380	361			38.8	69.8	54.4	79.8	58.4	31.7	
1255	390	371			39.8	70.3	55.3	80.3	59.3	32.8	
1290	400	380			40.8	70.8	56.0	80.8	60.2	34.1	
1320	410	390			41.8	71.4	56.8	81.4	61.1	35.1	
1350	420	398			42.7	71.8	57.5	81.8	61.8	36.4	
1385	430	408			43.6	72.3	58.2	82.3	62.7	37.4	
1420	440	418			44.5	72.8	58.8	82.8	63.5	38.4	
1455	450	428			45.3	73.3	59.4	83.2	64.3	39.4	
1485	460	437			46.1	73.8	60.1	83.8	64.9	40.1	
1520	470	447			46.9	74.1	60.7	83.9	65.7	41.1	
1555	480	(458)			47.7	74.5	61.3	84.3	66.4	42.2	
1595	490	(468)			48.4	74.9	61.8	84.7	67.1	43.1	
1630	500	(475)			49.1	75.2	62.2	85.0	67.7	43.8	
1665	510	(485)			49.8	75.7	62.9	85.4	68.3	44.7	
1700	520	(494)			50.5	76.1	63.5	85.7	69.0	45.6	
1740	530	(504)			51.1	76.4	63.9	86.0	69.5	46.2	
1775	540	(513)			51.7	76.7	64.4	86.3	70.0	47.0	
1810	550	(523)			52.3	77.0	64.8	86.6	70.5	47.8	
1845	560	(532)			53.0	77.4	65.4	86.9	71.2	48.6	
1880	570	(542)			53.6	77.8	65.8	87.2	71.7	49.2	
1920	580	(551)			54.1	78.0	66.2	87.5	72.1	49.9	
1955	590	(561)			54.7	78.4	66.7	87.8	72.7	50.4	
1995	600	(570)			55.2	78.6	67.0	88.0	73.2	51.2	
2030	610	(580)			55.7	78.9	67.5	88.2	73.7	51.7	
2070	620	(589)			56.3	79.2	67.9	88.5	74.2	52.4	
2105	630	(599)			56.8	79.5	68.3	88.8	74.6	53.0	
2145	640	(608)			57.3	79.8	68.7	89.0	75.1	53.5	
2180	650	(618)			57.8	80.0	69.0	89.2	75.5	54.1	
680					58.3	80.3	69.4	89.5	75.9	54.7	
670					58.8	80.6	69.8	89.7	76.4	55.3	
660					59.2	80.8	70.1	89.9	76.8	55.7	
650					59.7	81.1	70.5	90.1	77.2	56.2	
700					60.1	81.3	70.8	90.3	77.6	56.7	
720					61.0	81.8	71.5	90.7	78.4	57.7	
740					61.8	82.2	72.1	91.0	79.1	58.6	
760					62.5	82.6	72.6	91.2	79.7	59.4	
780					63.2	83.0	73.1	91.5	80.4	60.2	
800					64.0	83.4	73.8	91.8	81.1	61.0	
820					64.7	83.8	74.3	92.1	81.7	61.8	
840					65.3	84.1	74.8	92.3	82.2	62.2	
860					65.9	84.4	75.3	92.5	82.7	62.7	
880					66.4	84.7	75.7	92.7	83.1	63.1	
900					67.0	85.0	76.1	92.9	83.6	63.7	
920					67.5	85.3	76.5	93.0	84.0	64.1	
940					68.0	85.6	76.9	93.2	84.4	64.5	

Die eingeklammerten Zahlen sind Härtewerte, die außerhalb des Definitionsbereichs des genannten Härteprüfverfahren liegen, praktisch jedoch vielfach als Näherungswerte benutzt werden. Darüber hinaus gelten die eingeklammerten Brinell-Härtewerte nur dann, wenn ein Stoßhärteprüfverfahren gemessen wurde.
 1) Siehe Seite 1
 *) Errechnet aus HB = 0,95 · HV

LES TRANSFORMATIONS BAINITIQUES

Nous avons classé les transformations à l'état solide en deux catégories bien distinctes suivant qu'elles mettent en jeu ou non germination et croissance thermoactivée. En réalité il existe des entorses à cette distinction. C'est ainsi que l'on connaît depuis longtemps des transformations martensitiques isothermes : dans certains alliages, la transformation continue à se développer au cours d'un arrêt isotherme après le refroidissement au-dessous de M_s . La germination se poursuit à cette température sous l'effet des contraintes internes. La transformation se ralentit progressivement du fait du cloisonnement des grains d'austénite.

L'activation thermique peut également modifier le processus de croissance, par des mécanismes de diffusion à courte distance qui peuvent régir la croissance des cristallites de la phase fille. C'est le cas des *transformations bainitiques*, ainsi appelées d'après un constituant des aciers, la *bainite*, qui a reçu son nom en mémoire du métallurgiste américain Edgar C. Bain.

La bainite est un produit de décomposition de l'austénite en ferrite plus cémentite, qui se forme au cours de transformations isothermes ou au cours d'un refroidissement à des températures inférieures à celles du domaine perlitique, - au moins 200°C au-dessous du point A_3 . Les courbes TTT d'un acier peu allié (fig-a) montrent deux « nez » de transformation, correspondant aux domaines perlitique et bainitique, séparés par une « baie » d'autant mieux marquée que l'acier est plus allié en certains éléments. Dans les aciers au carbone eutectoïdes, les deux domaines ne sont pratiquement pas séparés. L'addition de 1% de chrome ou de 0,5% de molybdène fait apparaître une baie bien marquée entre les deux domaines. A des teneurs plus élevées, la séparation est totale et il existe même vers 500°C un intervalle de température où l'austénite est métastable, intervalle qui peut dépasser 200°C.

La température de la bainite n'a pu être résolue qu'avec l'avènement de la microscopie électronique en transmission, d'abord sur répliques, puis sur lames minces. C'est un constituant diphasé de ferrite en plaquettes et de très fines particules de cémentite (fig-b). Suivant les températures de transformation, l'arrangement de ces deux phases est légèrement différent. Il est clair que, vu les températures relativement basse, la redistribution du carbone ne peut plus se faire comme dans la perlite, aussi fine soit-elle. Contrairement à celle-ci, la phase carbure ne peut être enrichie en éléments carburigènes. Un nouveau mécanisme ne met en jeu que de courtes distances de migration des atomes de carbone doit intervenir.

Il s'agit très probablement d'une germination de la ferrite du type « déplacement », à la manière de la martensite, l'enthalpie libre motrice augmentant au fer et à mesure que la température diminue : la température de début de transformation B_s est d'autant plus basse que la teneur en éléments d'alliage est plus élevée. Suivant les modèles actuellement en vigueur, la croissance s'effectuerait soit par un mécanisme de cisaillement, soit par déplacement de marches (ou *ledges*), à l'interface, en accord avec la forme de plaquettes lenticulaires ou de *lattes* qu'affectent les cristallites de ferrite bainitique. Du fait de la rapidité de la croissance des lattes de ferrite, seule la diffusion des atomes de carbone (en sursaturation dans la ferrite) est possible à courte distance, mais pas celle des éléments d'alliage. Suivant la température, le rejet du carbone s'effectue soit à l'interface à la manière de la précipitation interphase des carbures alliés - c'est la *bainite supérieure* -, soit par précipitation plus localisée dans les lattes elles-mêmes - *bainite inférieure* (fig-c).

La microstructure bainitique offre un grand intérêt pour le métallurgiste, car elle confère à l'acier une excellente résistance mécanique, alliée à une bonne ductilité.

Ceci est dû à la dispersion des carbures, légèrement différente de celle d'une martensite revenue. Des transformations de type bainitique ont été observées dans des alliages à base de cuivre et même dans des céramiques. Il est convenu de réserver le nom de *transformations bainitiques* aux transformations de type « displacif » accompagnées de processus de diffusion : leur cristallographie suit donc les mêmes règles que les transformations martensitiques.

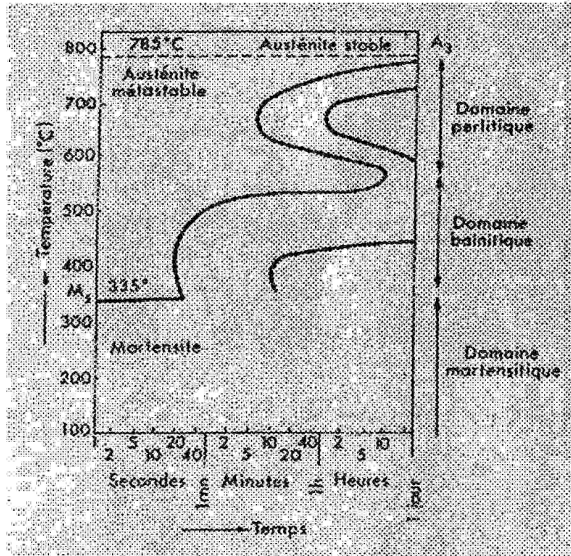


Fig-a – Courbes TTT d'un acier (0.4%C) faiblement allié au Ni (1.5%)-Cr (1%)-Mo 0.3%.

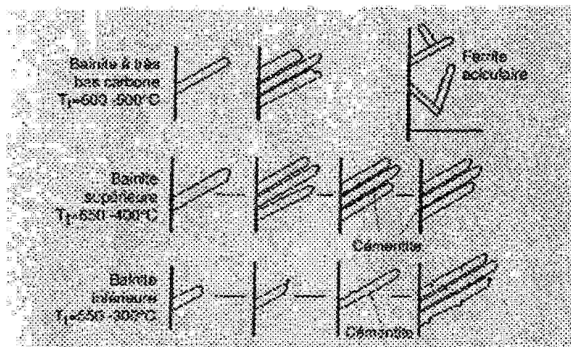
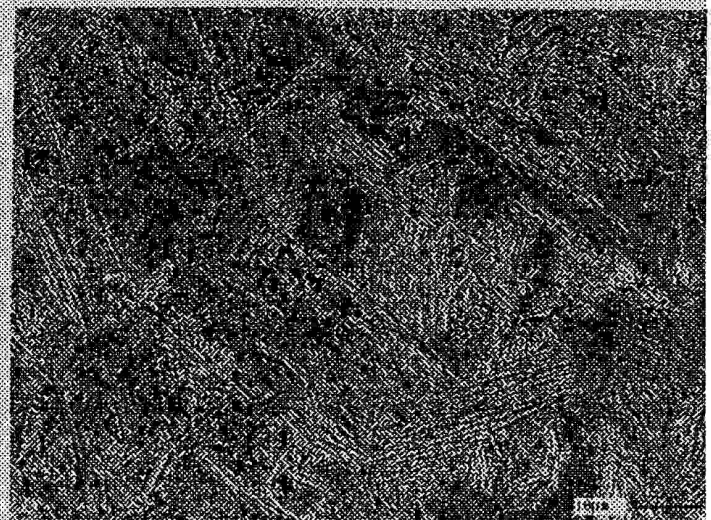


Fig-b – Schéma de la microstructure bainitique.

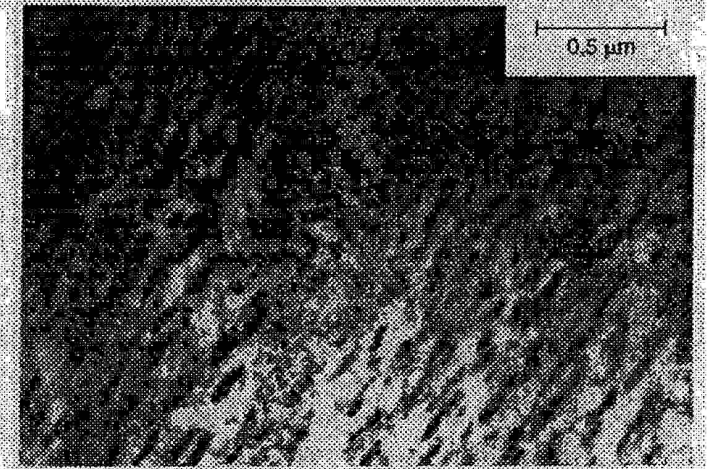


Fig-c – 1-Bainite supérieure ; acier 0.5%C, 0.8% Mn après transformation isotherme à 500°C, micrographie optique.

2- Bainite supérieure ; même acier, transformation isotherme à 300°C.

Noter les alignements de carbures dans les lattes; micrographie électronique en transmission.

Clichés David Quidort, LTPCM, INP Grenoble.

TECHNISCHE LIEFERVORSCHRIFTEN

TECHNISCHE LIEFERVORSCHRIFTEN
PRESCRIPTION TECHNIQUE DE FOURNITURE

Nr. 002 (011)

Blatt 4 von 14
Feuille du

Teil Bleche
Pièces Tôles

Ident-Nr. --
N. d'ident.

MAT. NER	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Ni	Cu	Mo	Al	V	Nb	Zr	N	B
34	max. 0.16 0.18	max. 0.50 0.50	max. 1.50 env. Ca 1.60	max. 0.030 0.030	max. 0.030 0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	max. 0.18 0.18	max. 0.50 0.50	max. 1.70 1.70	max. 0.030 0.030	max. 0.030 0.030	-	0.12- 0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ 46	max. 0.21 0.21	max. 0.50 0.50	max. 1.70 1.70	max. 0.030 0.030	max. 0.030 0.030	-	0.12- 0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FG 47	max. 0.20 0.20	0.10- 0.50	1.20 1.70	max. 0.035 0.035	max. 0.035 0.035	-	-	0.40- 0.70	-	-	-	0.1- 0.18	-	-	-	-
St 60-2	0.40	--	--	max. 0.055 0.055	max. 0.055 0.055	-	-	-	-	-	-	-	-	max. 0.028 0.028	-	-
St 37-3	max. 0.17 0.17	-	-	max. 0.045 0.045	max. 0.045 0.045	-	-	-	-	-	-	-	-	max. 0.009 0.009	-	-
VAR 3-03	0.1- 0.2	0.15- 0.70	max. 1.60 1.60	max. 0.030 0.030	max. 0.020 0.020	-	-	max. 1.50 1.50	-	max. 0.70 0.70	-	-	-	-	-	max. 0.005 0.005
VAR 15	max. 0.25 0.25	0.70- 0.70	1.00 1.00	max. 0.035 0.035	max. 0.035 0.035	-	-	-	-	min. 0.10 0.10	-	-	-	0.07- 0.07	-	-

LIEBHERR

TECHNISCHE LIEFERVORSCHRIFTEN
PRESCRIPTION TECHNIQUE DE FOURNITURE

Blatt
Feuille 6 von
du 14

Teil
Pièce Bleche
Tôles

Blatt Nr.
Feuille N°

3. CARACTERISTIQUES DE
RESISTANCE

3. FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN

MATERIAU WERKSTOFF	GENRE DE DESODY- DATION (1) DAT-ART	ETAT DE TRAITEMENT (2) BEHANDLUNGS- ZUSTAND	DURETE HB 30 (7) HARTE HB 30	LIMITE ELASTIQUE Rp 0,2 N/mm ² (3) STRECK- GRENZE R _p 0,2 N/mm ²	RESIST. A LA TRACTION Rm N/mm ² (3) ZUGFESTIG- KEIT R _m N/mm ²	ALLONGE- MENT A % (3) DEHNUNG A %	RESILIENCE ak min. J (4) KERSCHLAG- ZÄHLIGKEIT ak min. J	ANGLE DE CINTRAGE 180°-ESSAI DE PLIAGE (5) Ø MANBRIN BIEGEWINKEL VON 180° IM FALTVERSUCH DORN Ø
St 60-2	R	U, N	180- 215	min. 334	590-706	15	--	--
St 37-3	RR	U, N	110- 135	min. 235	363-441	25	27 ± 0°C	1a
OXAR 360S	--	V	360- 440	~ 1000	~ 1250	~ 10	27 - 40°C	3a
XAR 15	--	V	280	--	9-2-1177	--	--	~25 mm 3,5a ~25 mm 4,0a

ARTICULO	NOMBRE DE BORDOS EN UN CARTE	ESTADO DE TRATAMIENTO	DUREZA HB 30	LITAJE PLANTILLA	RESIST. A LA TRACCIÓN	RESIST. A LA TRACCIÓN	RESIST. A LA TRACCIÓN	RESIST. A LA TRACCIÓN	RESIST. A LA TRACCIÓN	RESIST. A LA TRACCIÓN
ART-STAFF	(1)	(2)	(7)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(4)	(5)
	D. BORDO EN UN CARTE	BEHANDLUNGS-ZUSTAND	HARTE HB 30	SPACK-GRÖÖZE IN mm	ZUGFESTIGKEIT IN N/mm ²	ZUGFESTIGKEIT IN N/mm ²	ZUGFESTIGKEIT IN N/mm ²	ZUGFESTIGKEIT IN N/mm ²	WENN BEI +10°C	WENN BEI +10°C
ST 10.03	(5)	Etat de Tamisage	80-150	--	280-500	280-500	280-500	--	--	1 a
ST 12.03	U	Et. de Tam. Walzzustand	80-125	--	280-420	280-420	280-420	min. 27	--	--
ST 13.04	U	Et. de Tam. Walzzustand	80-120	min. 270	280-500	280-500	280-500	min. 27	--	--
ST 37-1	U	U, N	110-135	min. 240	370-450	370-450	370-450	min. 18	1 a	1 a
ST 37-2	R	U, N	110-135	min. 240	370-450	370-450	370-450	min. 18	27 bei +10°C	1 a
ST 50	R	N	150-180	min. 280	500-600	500-600	500-600	min. 20	--	--
ST 52-3	R	N	155-135	min. 360	520-620	520-620	520-620	min. 16	27 bei +10°C	2 a >16 mm 3 a
ST 90 L	R	N	15-40: min. 235	min. 590	515mm: min. 980 >15-40: min. 780	515mm: min. 980 >15-40: min. 780	515mm: min. 980 >15-40: min. 780	min. 10	47 bei +20°C	5 a
ST 60	RR	N	205-245	min. 590	680-830	680-830	680-830	min. 15	39 bei +20°C	3 a
ST 60	R	V	210-250	min. 590	690-830	690-830	690-830	min. 18	47 bei +20°C	3 a
ST 60	R	V	240-285	min. 690	790-950	790-950	790-950	min. 16	50 bei +20°C	3 a
ST 34	R	N	140-175	min. 340	460-560	460-560	460-560	min. 27	27 bei +20°C	0,5 a
ST 36	R	N	155-185	min. 360	480-610	480-610	480-610	min. 25	27 bei +20°C	0,5 a
ST 46	R	N	165-212	min. 460	550-700	550-700	550-700	min. 21	27 bei +20°C	1 a
ST 47	R	N	170-220	min. 450	560-730	560-730	560-730	min. 17	51 bei +20°C	3 a