

N° d'ordre : GM/...../2020

Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER
En Génie Mécanique

Option : FABRICATION MÉCANIQUE ET PRODUCTIVE

Présenté par :

AICHAOUI BELKACEM & ROUABHI ABDELHAK

Thème :

**Etude de la Métallurgie du soudage.
Contrôle d'un joint de soudure par
Essais non Destructif.**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
DEBIH Ali	MCA	Président
ZAOUI Moussa	MCA	Encadreur
BENKHERBACHE Houria	MCB	Examineur

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous tenons à notre encadreur Monsieur: MOUSSA ZAOUI, fils précieux conseil et son aide pendant toute la période du travail et tous ceux qui ont réussi à préparer ce modeste travail,

Je voudrais également remercier tout particulièrement les parents pour leur soutien et leur patience dans notre étude.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les aciers	3
I. Introduction :	4
I.1 Les composent des aciers	4
I.1.2 Carbone :	6
I.1.3 Diagramme Fer -Carbone	6
I.1.4 Acier eutectoïde (0,77 %C)	8
I.1.5 Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C)	8
I.1.6 Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C) :	9
I.2 Traitements thermiques des aciers :	9
I.2.1 Trempe, ou durcissement par trempe :	9
I.2.2 Revenu	11
I.2.3 Recuit :	11
I.2.4 Effets des éléments d'addition	12
I.3 Classification des aciers	13
I.3.1 Aciers non alliés d'usage général (S, E, et C.)	13
I.3.2 Aciers spéciaux, non alliés, de type C	15
I.4 Fontes	20
II.4.1 Fontes à graphite lamellaire EN-GJL « FGL »	21
II.4.2 Fontes à graphite sphéroïdal EN-GJS « FGS »	21
II.4.3 Fontes malléables EN-GJMW et GJMB « FMB et FMN »	21
I.4.4 Autres familles des aciers et fonts	23
Chapitre II :	25
Généralités sur les Procédés de soudage	25
II.1 Introduction:	26
II.2 Procédés desoudage	26

II.3	Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	40
II.4	Aspect thermique lié au soudage.....	41
II.5	Les défauts des soudures	44
Chapitre III :		47
Métallurgie sur les procédés de soudage		47
Chapitre III métallurgiques de soudage des aciers		48
III.	Introduction :	48
III.1	Notions sur la métallurgie du soudage:	48
III.2	Considérations générales:	49
III.2.a	Déformation d'origine thermique:	49
III.3	Caractéristiques de la soudure:	50
III.4.1	Sous structure de solidification:	53
Chapitre IV : Partie Expérimentale		61
IV.	Introduction :	62
IV.1	Deux contrôles ont été utilisés :	63
.Le contrôle par ultrasons :		63
IV.2	Résultats HASNAOUI :	64
IV.2.1	Contrôle par Ressuage :	64
IV.2.2	Le contrôle par ultrasons :	69
Vérification des caractéristiques des palpeurs :		69
IV.3	Résultats AZZOUZ :	77
IV.3.1	Contrôle par Ressuage :	77
IV.3.2	Le contrôle par ultrasons :	79
IV.4	Comparaison des résultats :	83
Conclusions Générale		84

Listes des figures

Figure I.1: Une structure cristalline cubique centrée

Figure I.2 : Structure cristalline cubique à face centrée

Figure I.3 : Diagramme fer-carbone

Figure I.4 : Microstructures des aciers en fonction du pourcentage de carbone

Figure I. 5 : Constituants des aciers suivant la vitesse de refroidissement cas de l'acier eutectoïde à 0,77 % C

Figure I. 6 : Laminés marchands

Figure I. 7 : Désignations des aciers au carbone

Figure I. 8 : Désignation des aciers faiblement alliés

Figure I. 9 : Désignation des aciers fortement alliés

Figure I. 10 : Microstructures des fontes usuelles

Figure II.1 : Classifications des procédés de soudage

Figure II.2 : Principe de soudage par pression

Figure II.3 : Principe de soudage à l'arc électrique

Figure II.4 : L'électrode enrobée

Figure II.5 : Principe de soudage TIG

Figure II.6 : Soudage sous flux en poudre

Figure II.7 : Procédés de soudage MIG/MAG

Figure II.8 : Influence de la tension et de l'intensité du courant sur le régime de transfert de métal en soudage MIG dans l'argon

Figure II.9 : Observation à la caméra rapide des 3 régimes de transfert du soudage MAG : a- court-circuit (146 A, 16 V), b- globulaire (220 A, 19 V), c- spray (365 A, 27,8 V)

Figure II.10 : Le fil électrode

Figure II.11: Cordon de soudure

Figure II.12: Zone d'acier considéré à 0,15 %C et cycle thermique lors du soudage

Figure II.13: Les zones de grossissement, recristallisé, affecté et non affecté

Figure II.14: Inclusions gazeuses

Figure II. 15 : Inclusions de : a) laitier, b) tungstène, c) cuivre

Figure II. 16 : Les types de fissure

Figure III.1 : Variété de microstructures dans un cordon de soudure par

Figure III.2. Cycle thermique en soudage et transformations structurales

Figure III.3 : Effet du gradient de température sur le mode de solidification des soudures pour une vitesse constante

Figure III.4 : Schéma du gradient de température en fonction de la vitesse de croissance montrant les modes de solidification possibles

Figure III.5 : Différentes zones d'une soudure et diagramme TRCS (Δt 500-800° C) d'un acier XC48

FigureIV.1 : la pièce nettoyage

Figure IV.2 : Application le produit ressuage Rougé

FigureIV.3 : Élimination produit ressuage Rougé

Figure IV.4 :application du révélateur

FigureIV.5 : défauts dans la pièce après ressuage

Figure. IV.6 matériel utilisé

Figure. IV.7 détermination de la zone morte

Figure. IV.8 détermination du point d'émergence

Figure IV.9 : Choix le Palpeur (OT 70°)

Figure IV.10 calcul de recul max

Figure. IV.11 calcul de l'étendu

Figure IV.12 : Contrôle la pièce par ultrasons

Figure IV.13 : tracé de l'écho de défaut I

Fig. (IV.14) : produit nettoyage

Fig. (IV.15) : la pièce nettoyage

Fig. (IV.16) : produit ressuage Rougé.

Fig. (IV.17) : la pièce

Fig. (IV.18) : produit ressuage

Fig. (IV.19) : défauts -1- don pièce

Fig. (IV.20) : défauts-2- don pièce

Fig. (IV.21) : Schéma de principe de mise en œuvre de Ultrasons

Fig. (IV.22) : Palpeur émetteur-récepteur : MSEB4

Fig. (IV.23) : calibre d'étalonnage V1

Fig. (IV.24) : Générateur d'ondes ultrason : USL32

Fig. (IV.25) : Contrôle la pièce par ultrasons

Fig. (IV.26) : Tracé de l'écho enregistré au niveau 2 défaut.

Fig. (IV.27) : tracé de l'écho enregistré au niveau 1 défaut.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principaux aciers non alliés

Tableau I.2 : Aciers inoxydables - extrait NF EN 10088

Tableau I.3 : Principales fontes

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients du soudage MIG-MAG

Tableau II.2 : Protections gazeuses utilisées en soudages MIG et MAG

Tableau III.1 : Température de fusion de quelques éléments métalliques couramment présent dans les acier.

Introduction Générale

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique, et thermomécanique.

L'intérêt de la connaissance métallurgique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation aussi quantitative que possible des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix du métal de base, des procédés et des modes opératoires.

Les opérations de soudage d'aciers s'accompagnent de phénomènes thermique métallurgique et mécanique. Ces phénomènes induisent inévitablement des champs de contraintes internes dans le rôle peut être déterminant sur la qualité et la tenue mécanique du composant.

Les applications de la technique du soudage, au sens où nous les envisageons aujourd'hui, ont débuté pratiquement avec le vingtième siècle, mais ce n'est en fait qu'au cours des vingt dernières années que ces applications ont pris une réelle ampleur dans le domaine industriel.

L'évolution lente à ses débuts, s'est ensuite accélérée de façon telle qu'on peut affirmer aujourd'hui que bien des conditions de notre vie moderne dépendent de la technique du soudage.

Malgré les accidents spectaculaires survenus dans le passé telles que les ruptures des ponts soudés, produites en Belgique, et en Allemagne, et qui ont été suivies des ruptures analogues des navires soudés aux états unis, ces accidents sont cependant avérés très féconds en enseignements. L'analyse critique de leurs causes a fait apparaître des erreurs dans la conception de ces constructions, et l'intervention simultanée de plusieurs facteurs, toujours les mêmes, les études et les recherches relatives à ces facteurs ont conduit à des résultats qui constituent un des fondements de nos connaissances actuelles sur le soudage.

Le grand nombre d'applications du soudage et la grande variété des procédés mis en oeuvre résultent non seulement de la diversité des types de matériaux à assembler et de la multiplicité des conditions imposées aux constructions en service, mais aussi de la recherche toujours plus poussée d'une meilleure rentabilité.

Cette recherche a conduit à la mise en oeuvre de nouveaux procédés caractérisés par une concentration plus grande de leurs sources de chaleurs, ces nouveaux procédés permettent

D'étendre le domaine d'application du soudage à des matériaux nouveaux caractérisés par leurs très haute température de fusion, et de limiter les déformations dues au soudage.

Les liaisons étroites qui se sont développées entre le soudage et la métallurgie ont ouvert de nouvelles perspectives de développements pour de nombreuses branches de l'industrie; elles ont conduit à une amélioration significative de la qualité des métaux et alliages, en vue de permettre leur assemblage aisé par soudage.

Les problèmes particuliers posés par le soudage ont d'ailleurs souvent été à l'origine d'une meilleure connaissance de certains phénomènes, tels que par exemple celui de la fragilité des aciers à basse température, qui a été mise en évidence de manière particulièrement spectaculaire dans certaines constructions soudées et vis-à-vis de laquelle des précautions et des remèdes ont été étudiés en vue d'en limiter les effets néfastes.

D'une façon générale, les problèmes liés au soudage sont complexes et difficiles à analyser quantitativement, compte tenu du grand nombre de paramètres intervenants.

La plupart des travaux sont consacrés à l'étude de la fissuration en racine et en pied de cordon, lorsque les fissures se propagent dans le métal de base, les fissures sont assez fréquentes et les plus dangereuses.

Aussi de nombreux aciéristes cherchent à améliorer les caractéristiques du métal de base et son comportement vis à vis des cycles thermiques et des contraintes résultants des différents procédés de soudage.

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I. Introduction :

Les aciers sont d'une importance capitale puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Ce progrès est dû qui permettent de varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers à la présence d'une vaste gamme de transformation en recourant à l'addition d'éléments d'alliage et aux différents mécanismes, thermiques et chimiques.

. Définition de l'acier

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone). C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « **acier** ». Au-delà de 2% les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier ; si l'on ajoute plus de 0,5 % d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié. Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié.

I.1 Les composants des aciers

Les constituants les plus importants sont le Fer et le Carbone, et les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en trois (03) catégories :

- a) **Les impuretés** : originellement présentes dans les ingrédients de haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (S) et le phosphore (P) présent dans le coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi que nombre d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb).
- b) **Les éléments d'additions** : des éléments chimiques peuvent être ajoutés pour résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).
- c) **Les éléments d'accompagnements** : que l'aciériste utilise en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir en final un acier

conforme à la spécification. C'est le cas d'éléments comme l'aluminium, le silicium, le calcium.

. Propriété générale de l'alliage fer-carbone :

Les aciers et les fontes sont les alliages du fer et du carbone avec éventuellement des éléments d'addition (aciers alliés). Ils sont peu coûteux (le fer, métal de base le moins cher, existe en grande quantité sur la planète) et sont facilement recyclable.

Le fer perd ses propriétés magnétiques au-dessus de 768 °C, point de Curie, et existe sous plusieurs formes en fonction de la température (densité 7,88) (figure I.3):

- **Fer α (alpha)** : il existe jusqu'à 912 °C. De structure cristalline à maille cubique centrée (figure I-1), il ne dissout pratiquement pas le carbone (0,022 %C à 727 °C, 0,008 %C à température ambiante). La solution fer α s'appelle la ferrite.

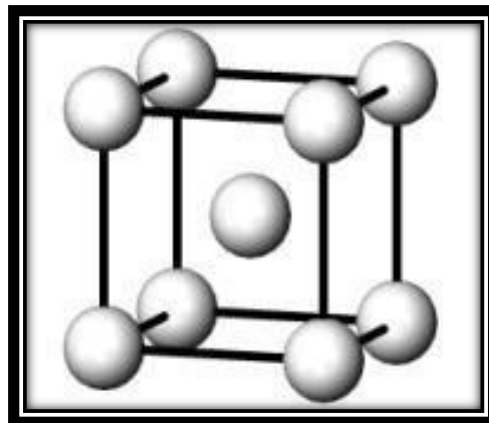


Figure I.1: Une structure cristalline cubique centrée

- **Fer γ (gamma)** : il est stable entre 912 °C et 1394 °C de maille cubique à faces centrées (figure I-2), il peut absorber, ou « dissoudre », beaucoup plus d'atomes de carbone que le fer α car les interstices sont plus nombreux entre les atomes. La proportion maximale est de 2,11 % à 1148 °C. La solution fer γ s'appelle l'austénite.

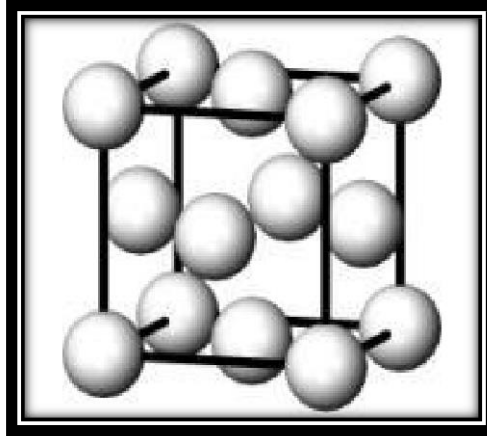


Figure I.2 : Structure cristalline cubique à face centrée

- **Fer δ (delta) :** il est stable entre 1394 °C et 1538 °C ; de maille cubique centrée (figure I-1), il a peu d'importance sur le plan industriel.

I.1.2 Carbone :

Il fond à 3500 °C et cristallise sous trois formes possibles : le graphite, le diamant et le noir de fumée. C'est un 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. L'augmentation progressive de la teneur en carbone conduit à une réduction des domaines de température correspondant à la transformation à chaud et au traitement thermique.

I.1.3 Diagramme Fer -Carbone

Le carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés mécaniques des aciers : au-dessous de 0.008 %, l'alliage est malléable et c'est pratiquement de fer pur au-delà de 2.11 %, les inclusions de carbone sont sous forme de graphite fragilisent la microstructure et on parle de fontes. L'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique de l'alliage.

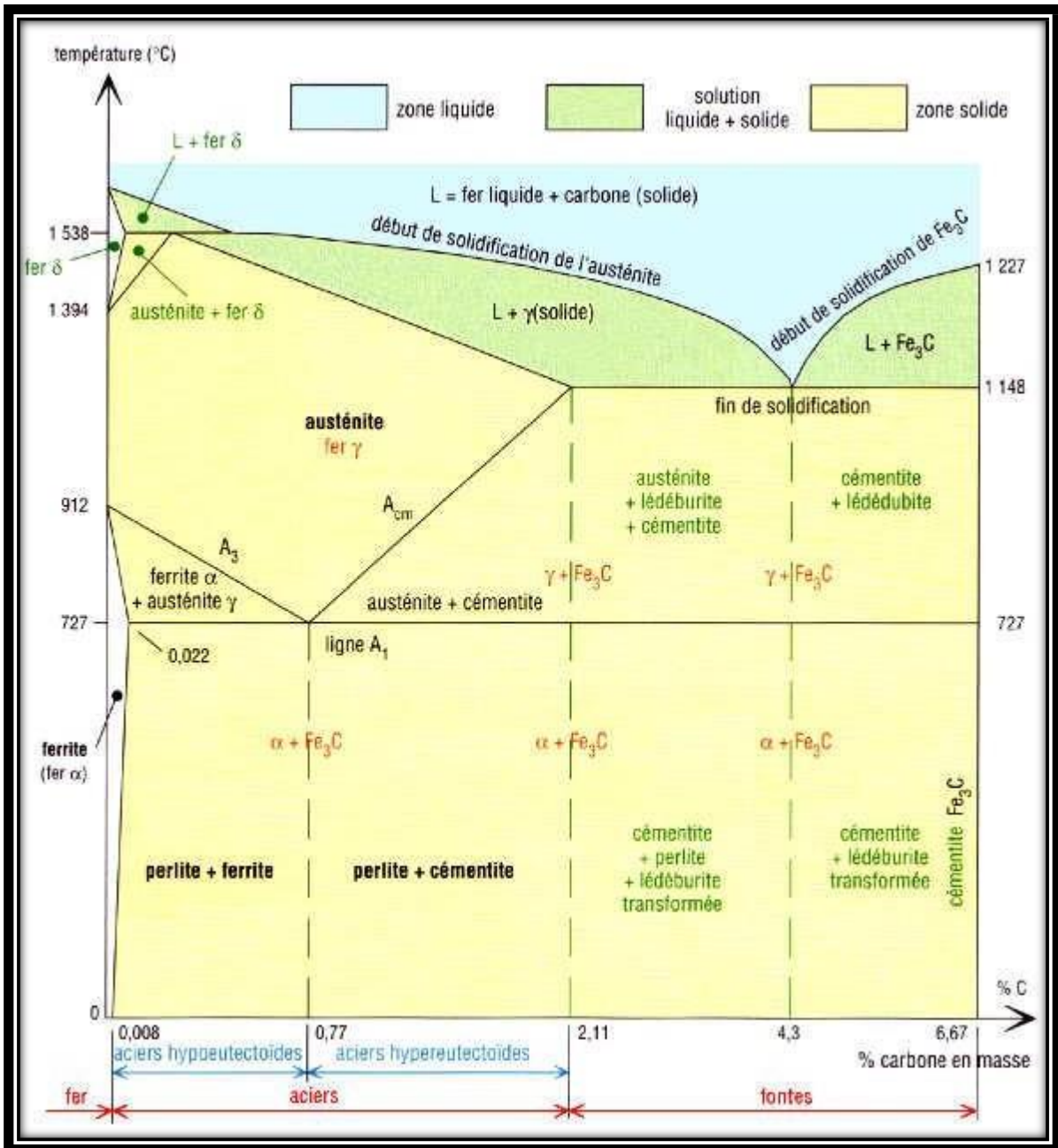


Figure I.3 : Diagramme fer-carbone

Alliés avec le fer, 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 Fe₃C 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, matériau fragile, cassant, très dur) et fait

apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux les aciers (entre 0,008 et 2,1 %C) et les fontes (de 2,1 % à 6,67%C).

Ligne A₁ (727 °C) : elle marque la fin de la transformation de la perlite, mixture de fer contenant 0,77 %C, en austénite ; au-dessus de 727 °C la perlite n'existe plus.

Ligne A₃ : elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite la ferrite n'existe plus au-dessus 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.

Exemples : A_{r1} signifie passage de la ligne A₁ lors d'un refroidissement ; A_{c3} passage de A₃ lors d'un chauffage ; passage de A_{cm} lors d'un chauffage.

Lorsque les refroidissements sont suffisamment lents, l'austénite se transforme d'abord en ferrite qui, compte tenu des interstices plus petits de sa maille, ne peut pas absorber tous les atomes de carbone libérés. En conséquence, au fur et à mesure que la température diminue, une partie du carbone libéré se combine avec les atomes de fer pour produire de la cémentite. Cette cémentite s'agglomère avec la ferrite précédente pour donner la perlite. En fin de refroidissement on peut obtenir trois cas d'aciers.

I.1.4 Acier eutectoïde (0,77 %C)

Toute l'austénite initiale est précipitée en perlite : un seul constituant de base contenant 0,77 %C.

I.1.5 Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C)

Ce sont les plus utilisés industriellement ; ils ont deux constituants de base, la perlite et la ferrite. Au refroidissement l'austénite se transforme d'abord en perlite, mais comme il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour n'obtenir que de la perlite, il reste toujours une certaine quantité de ferrite dont la proportion est fonction du pourcentage de carbone initial.

I.1.6 Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C) :

Ils ont deux constituants de base, la perlite et la cémentite. Tout le carbone initial ne pouvant être dissous et consommé par la perlite, les atomes restants s'amalgament avec le fer pour former de la cémentite, dans des proportions qui sont fonction du pourcentage de carbone initial.

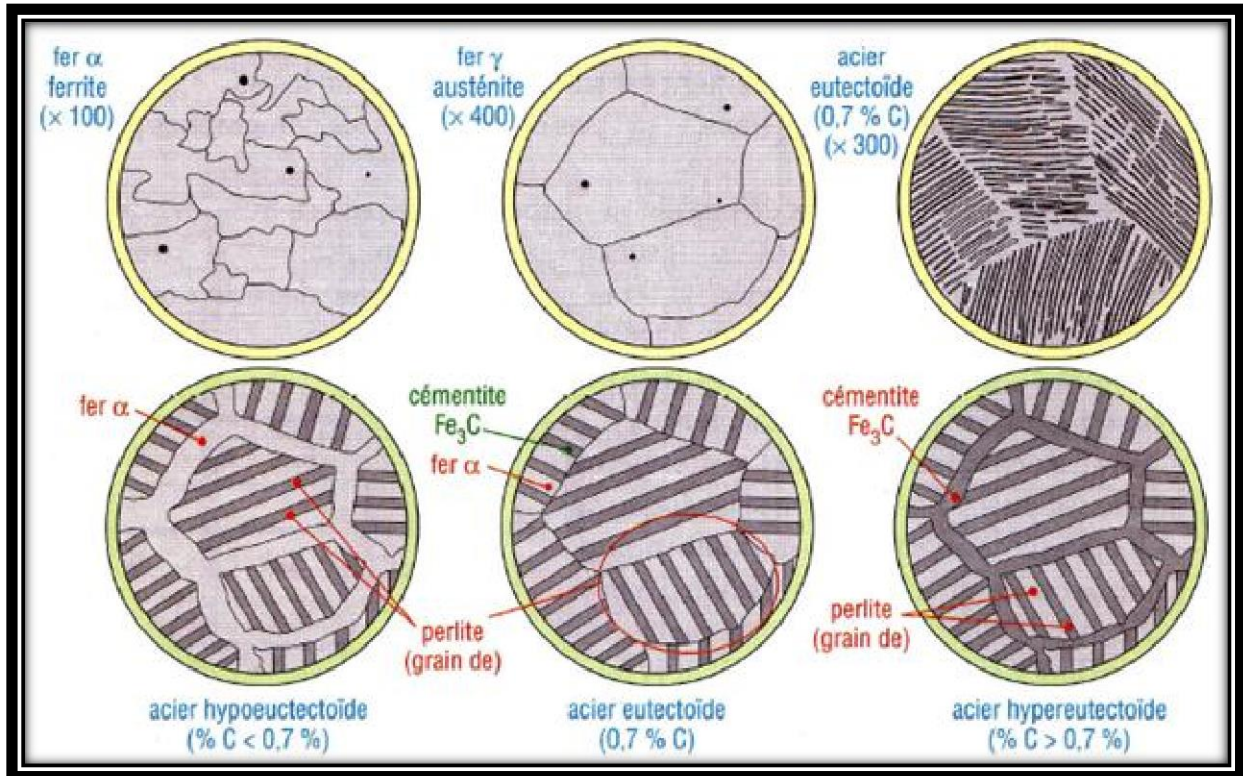


Figure I.4 : Microstructures des aciers en fonction du pourcentage de carbone.

I.2 Traitements thermiques des aciers :

La structure et les propriétés mécaniques (R_r , R_e , H , $A\%$, K) des aciers peuvent être modifiées par un chauffage suivi d'un refroidissement à durée contrôlée. Ce sont les traitements thermiques dans la masse trempés, revenus et recuits. Les transformations sont effectuées près des lignes A_1 , A_3 et A_{cm} du diagramme fer carbone.

I.2.1 Trempe, ou durcissement par trempe :

Lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser et les transformations décrites dans les paragraphes précédents n'ont plus le temps de se réaliser.

L'austénite n'a plus le temps de perdre son carbone et ne peut se transformer ni en ferrite ni en perlite. La solution de fer obtenue, sursaturée en carbone, est appelée martensite ; elle est très dure, $HB = 750$, et très fragile. C'est le constituant de base des aciers trempés.

Procédé : on chauffe la pièce jusqu'à température d'austénitisation suivi d'un maintien en température afin d'homogénéiser la structure, puis on refroidit rapidement (eau, huile...).

La transformation de toute l'austénite en martensite n'est possible que si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide.

Dans le cas contraire il y a formation d'autres constituants plus tendres : bainite, perlite...

Propriétés : elle augmente R_r , R_e et H mais diminue K et A %. Elle amène aussi l'apparition de tensions internes génératrices de criques et de déformations.

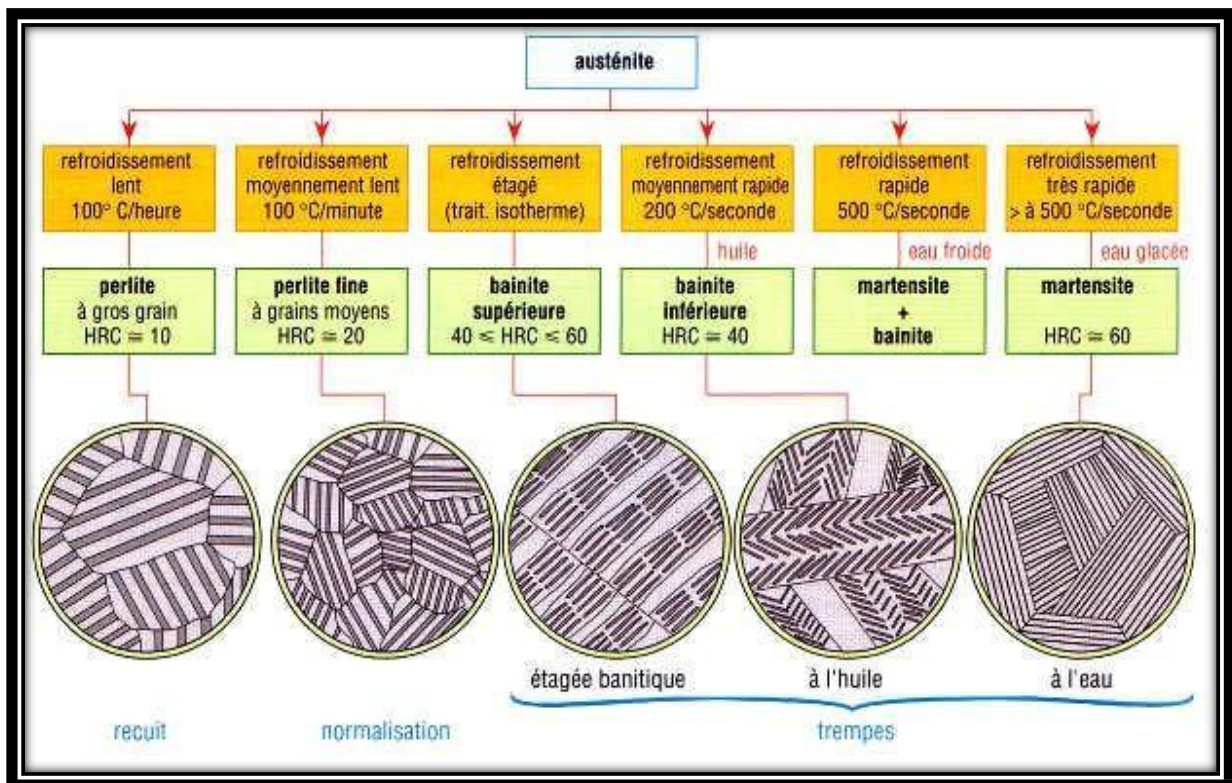


Figure I. 5 : Constituants des aciers suivant la vitesse de refroidissement cas de l'acier eutectoïde à 0,77 % C.

I.2.2 Revenu

Après trempe, la martensite, très dure et très fragile, est pratiquement inutilisable dans cet état. Afin de corriger l'effet de fragilisation, tout en conservant un bon ensemble de caractéristiques (R_r , R_e , H), on pratique un revenu.

Procédé : il s'applique aux pièces trempées et consiste en un chauffage, à température inférieure à 700 °C, suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent et contrôlé. Le traitement permet d'amener les caractéristiques mécaniques au niveau souhaité.

Propriétés : augmentation de K et de A% ; atténuation des contraintes internes.

Inconvénients: diminution de H, de R_r et R_e . Les résultats dépendent essentiellement de la température de réchauffage.

Principaux revenus

Un réchauffage jusqu'à 220 °C élimine les contraintes internes et est pratiquement sans effet sur la dureté. Un accroissement de la température amènera un adoucissement de plus en plus grand du métal, une dureté plus basse et une plus grande ductilité. Les températures de revenu les plus usuelles sont comprises entre 500 et 675 °C.

I.2.3 Recuit :

Son effet est inverse de celui de la trempe. Le métal est amené au maximum de ses caractéristiques de ductilité : A% et K maximales, R_r et H minimales. La structure obtenue, perlite et ferrite, présente une meilleure usinabilité.

Procédé : Le procédé consiste en un chauffage au-dessus de la température d'austénitisation suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent.

Différents recuits

- Recuit d'homogénéisation : il détruit l'hétérogénéité chimique des aciers bruts de coulée.
- Recuit de régénération il affine et uniformise le grain du métal.
- Recuit de détente il fait disparaître les contraintes internes après moulage ou soudage.
- Recuit de recristallisation : pour les aciers forgés ou écrouis.
- Recuit complet : il facilite l'usinage et la déformation à froid en faisant disparaître les constituants les plus durs.

Sur le plan industriel une même opération de recuit peut englober les caractéristiques des cinq cas précédents.

I.2.4 Effets des éléments d'addition

Pour des aciers ordinaires, ne contenant pas d'éléments d'alliage on peut distinguer : Les aciers doux, mi- doux, durs, mi-durs et extra durs (classification traditionnelle). On peut obtenir des aciers ayant des propriétés très variées grâce à l'ajout des éléments d'addition et la mise en œuvre de traitements thermiques appropriés. Les éléments d'addition ajoutés en quantité suffisante augmentent plus ou moins fortement la trempabilité et ont également une influence sur les caractéristiques mécaniques (R_r , R_e , H , $A\%$, K), la résistance à la corrosion, la soudabilité, la coulabilité, la forgeabilité, l'usinabilité, le magnétisme...

.Manganèse (Mn)

Le Manganèse a, sur le comportement des aciers à outils, une influence analogue à celle du nickel. Il se trouve, en général, présent comme élément résiduel à des teneurs comprises entre 0,3 et 0,5 %. Certains aciers à outils contiennent jusqu'à 2 % de manganèse pour des problèmes de trempabilité et, jusqu'à 1 % de cet élément lorsqu'ils sont resulfurés.

.Soufre (S)

Considéré en général comme une impureté. Le soufre, incorporé dans les aciers à outils jusqu'à des teneurs voisines de 0,1 %, permet d'améliorer l'usinabilité et l'état de surface des outils. Cette amélioration est d'autant plus importante que l'acier contient plus de carbone et d'éléments carburigènes. La réduction de ductilité provoquée par les additions de soufre n'est pas très importante dans le domaine des aciers à outils car les inclusions de sulfures sont en général associées aux carbures. Pour des teneurs en soufre supérieures à 1 %, les propriétés de résistance à l'usure de l'acier sont fortement affectées.

. Phosphore (P)

Élément non métallique, de numéro atomique 15 et de masse atomique 30,97. Il se présente sous trois formes allotropiques : le phosphore blanc ou ordinaire, de consistance cireuse, très inflammable et extrêmement toxique, le phosphore rouge ou amorphe, non toxique, et le phosphore noir. Il renforce la résistance des aciers à bas pourcentage de carbone.

. Cuivre (Cu)

Le cuivre, en petite proportion, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.

.Azote (N)

L'azote a une solubilité très faible (0,04 %) dans l'acier à l'état liquide. L'addition de certains éléments comme le chrome, le manganèse, le molybdène et le vanadium entraîne une augmentation de la solubilité de cet élément et il est possible de conserver des teneurs comprises entre 0,10 et 0,13 % après solidification de certains aciers à haute teneur en chrome et vanadium (aciers à coupe rapide par exemple). Ajouté en substitution partielle au carbone, l'azote entraîne une augmentation des propriétés mécaniques à chaud et de la résistance à la corrosion d'aciers à outils contenant des additions importantes de chrome; par contre, il entraîne un abaissement de la ductilité, de l'aptitude au soudage ainsi que de l'aptitude à l'usinage par certains procédés non conventionnels comme l'électroérosion.

I.3 Classification des aciers

Du fait de nombre élevé éléments ajouté au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimiques ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'acier:

- Les aciers non alliés (« Aciers au carbone »),
- Les aciers faiblement alliés, pour haute résistance,
- Les aciers fortement alliés,
- Les fontes.

. Aciers non alliés (« Aciers au carbone »)**I.3.1 Aciers non alliés d'usage général (S, E, et C.)**

Caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses et des variantes réservées à des usages particuliers (moulage, soudage...).

Propriétés spécifiées : ténacité, formabilité, grosseur de grain...

La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi-fini : galvanisés, nervurés, ondulés, etc. Normes : NF EN 10027 A02-005-3.

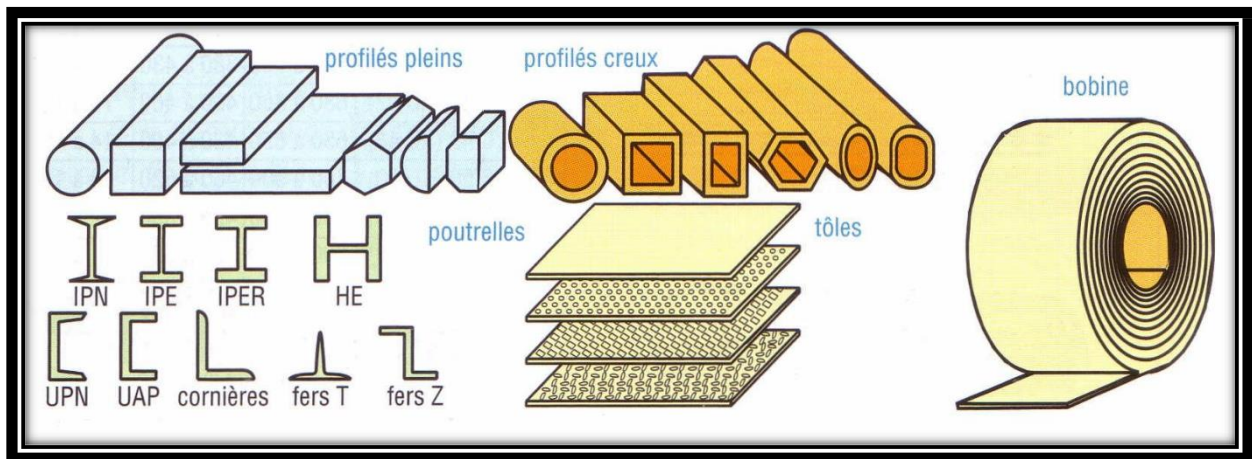


Figure I. 6 : Laminés marchands.

Applications (construction soudée, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...): carrosseries, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plateforme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager, biens de consommation...

a) Désignation normalisée

Lettre (S, E, etc.) suivie de la limite élastique à la traction R_e en Mpa ou N/mm^2 . S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G. Exemple : GE 335, GS 235, etc.....

b) Principales nuances normalisées

Remarques : les valeurs de R_r , R_e , A % et KV indiquées dans le tableau ci-dessous varient d'une qualité à l'autre, dépendent des procédés de fabrication, des traitements, des épaisseurs d'un produit à l'autre.

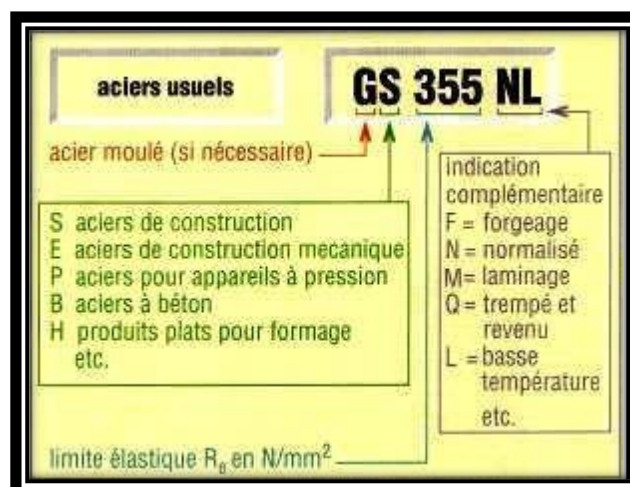


Figure I. 7 : Désignations des aciers au carbone.

Principaux aciers non alliés (1Mpa = 1 N/mm²)				
Nuances normalisées	R _r Mpa	Re Mpa	A%	KV (j) mini
Aciers de construction				
S 185 (A 33)	290 à 540	175 à 185	8 à 18	
S 235 (E 24)	320 à 510	175 à 235	15 à 26	23 à 27
S 275 (E 28)	380 à 580	205 à 275	12 à 22	23 à 27
S 355 (E 36)	450 à 680	270 à 335	12 à 22	23 à 40
Aciers de construction mécanique				
E 295 (A 50)	440 à 660	225 à 295	10 à 20	27 à 39
E 335 (A 60)	540 à 770	255 à 335	6 à 16	27 à 39
E 360 (A 70)	640 à 900	285 à 360	3 à 11	27 à 39
Pour cémentation				
C 20C (XC 18)	470 à 650	290 à 340	20 à 22	50
Pour trempé + revenu et pour forgeage				
C 25 (XC 25)	500 à 700	320 à 370	19 à 21	45
C 30 (XC 30)	550 à 750	350 à 400	18 à 20	40
C 35 (XC 38)	600 à 780	380 à 430	17 à 19	35
C 40 (XC 42)	630 à 800	400 à 460	16 à 18	30
C 45 (XC 48)	650 à 850	430 à 490	14 à 16	25
C 50 (XC 50)	700 à 900	460 à 520	13 à 15	-
C 55 (XC 55)	750 à 950	490 à 550	12 à 14	-
C 60 (XC 60)	800 à 990	520 à 580	11 à 13	-
Pour trempé superficielle				
C 40 (XC 42 TS)	Dureté de la couche trempée = 55 HR _C			

Tableau I.1. Principaux aciers non alliés**II.3.2 Aciers spéciaux, non alliés, de type C**

Destinés aux traitements thermiques (trempé, cémentation) des pièces petites ou moyennes, ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition, une plus grande

pureté et des éléments d'addition en très faible quantité ($Mn < 1 \%$; $Cr + Ni + Mo < 0,63 \%$).

a) Désignation

Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus au besoin des indications

Complémentaires (E = teneur en soufre, C = formage à froid, S = ressort, D = tréfilage...).

a) Principales nuances normalisées

Les caractéristiques mécaniques varient selon les traitements et les dimensions.

- **Aciers à faible teneur en carbone (< 0,3 %)** : ils sont réservés à la cémentation et aux traitements de surface (catégorie des aciers "doux").
- **Aciers à teneur moyenne en carbone (0,3 à 0,5 %)** : ils sont utilisés pour les trempes et les revenus, dans le cas d'applications exigeant une plus grande résistance et une certaine tenue à l'usure (catégorie des aciers "mi-dur").

Applications : pièces moulées et forgées, arbres, axes, engrenages, visserie...

- **Aciers à haute teneur en carbone (> 0,5 %)** : ils sont employés pour des applications exigeant : grandes duretés, hautes résistances, tenue à l'usure. Ils ont tendance au gauchissement et aux déformations après trempe. Ils perdent leurs propriétés aux hautes températures. Ne durcissant pas en profondeur ils sont surtout utilisés pour des pièces « petites » en volume, ou minces.

Aciers faiblement alliés, pour haute résistance

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5 % en masse (Mn 1 %). Ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée.

Désignation normalisée

Pourcentage de carbone multiplié par 100, suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant. Puis, dans le même ordre, les pourcentages de ces mêmes éléments multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 (voir détails figure I. 8), plus au besoin des indications complémentaires.

Exemple : G 35 Ni Cr Mo 16 (0,35 % de carbone ; 4 % de nickel et des traces < 1% de chrome et de molybdène, G acier moulé).

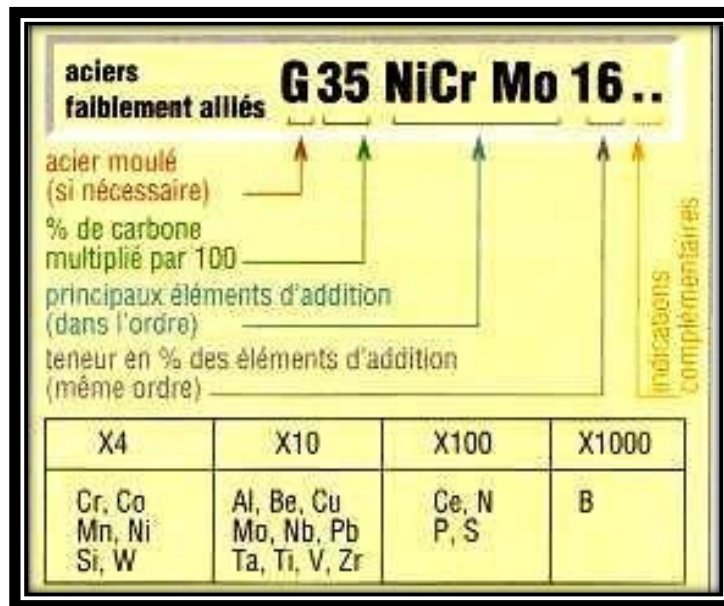


Figure I. 8. Désignation des aciers faiblement alliés.

Aciers de cémentation (% C < 0,2 %)

En plus de la cémentation, ils peuvent recevoir une trempe dans la masse : trempabilité fonction de la composition.

Aciers pour trempe dans la masse

Ils permettent la trempe en profondeur des pièces massives, et sont beaucoup plus performants que les aciers C.

Aciers fortement alliés

Ils sont destinés à des usages particuliers (inoxydable...). Pour ces aciers au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5 % en masse.

Désignation

Lettre X, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés. Seule différence : pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition (ni 10, ni 4, ...).

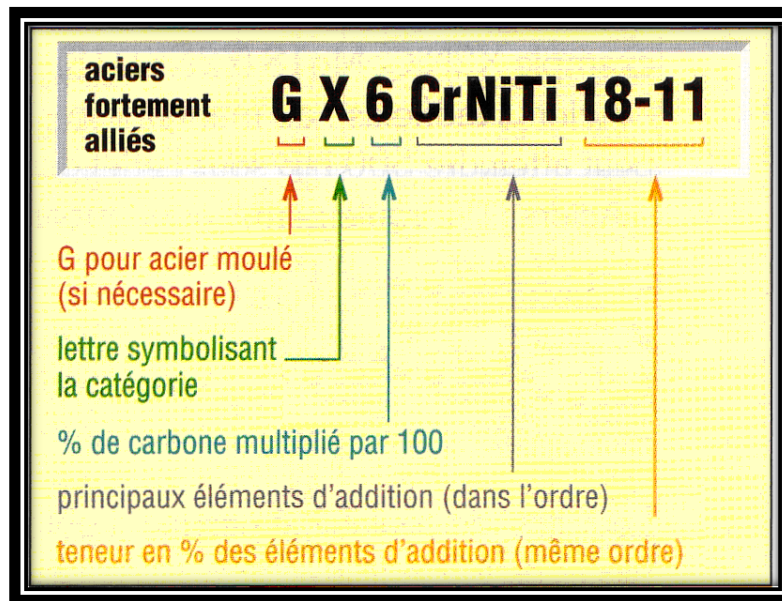


Figure I. 9. Désignation des aciers fortement alliés.

Aciers inoxydables

Famille très importante, caractérisée par une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud, au fluage et subdivisée suivant la teneur en nickel (2,5 %).

- **Aciers inoxydables austénitiques**

Ces aciers, les plus utilisés, sont les plus résistants à la corrosion (Ni 7 %). Leurs caractéristiques sont : tenue aux températures élevées et à l'écaillage ; ductilité (A % élevé) ; résilience ; faciles à forger et à souder ; usinabilité médiocre. Ils peuvent être durcis par corroyage (écrouissage) mais pas par trempe. Leur degré de dilatation est élevé et leur conductibilité thermique assez basse. Nombreuses nuances.

Applications (chimie, alimentaire, transports, nucléaire...) : pièces embouties, chaudronnées, cuves, réservoirs, armatures, conduites, vannes, visserie,...

Aciers inoxydables – extrait NF EN 10088				
Nuances	R _{e0.2} (daN /mm ²)	R _r (daN /mm ²)	A%	KV (J)
(état adouci)	Ferritiques			
X2CrNi12	25-28	45-60	20	-
X6Cr17	22-24	40-63	20	-
X6Cr17	24-26	40-63	20	-
X6CrMo17-1	26-28	45-66	18	-
(état adouci)	austénitique			

X2CrNi19-11	18-22	46-68	45	90
X5CrNi18-10	19-23	50-75	45	90
X6CrNiTi18-10	19-22	50-72	40	90
X5CrNiMo17-12-2	20-24	50-70	40	90
X5CrNiMoTi17-12-2	20-24	50-70	40	90
X2CrNiMoN17-13-5	27-29	58-80	35	90
(état traité)	martensitiques			
X12Cr13	40-45	55-85	15	25
X20Cr13	45-60	65-95	12	20
X30Cr13	60-65	80-100	10	20
X3CrNiMoN13-4	65-80	78-110	12	50
(état traité)	Durcis par précipitations			
X5CrNiCuNb16-4	79	96-116	12	40
X5CrNiMoCuNb14-5	86	99-120	10	40

Tableau I.2. Aciers inoxydables - extrait NF EN 10088

- **Aciers inoxydables ferritiques**

Ils sont toujours ductiles ($C < 0,08 \%$), ne durcissent ni par trempe ni par écrouissage : ils sont faciles à étirer, former, plier, forger, rouler ($Ni < 1\%$).

Propriétés : les plus économiques, usinabilité médiocre, soudabilité moyenne ; peu résilients et faible résistance à la rupture (R_r) sous températures élevées.

Applications : équipements ménagers, décoration intérieure, automobiles, mobiliers...

- **Aciers inoxydables martensitiques ($0,08 \leq C \leq 1\%$)**

Résistent aux chocs, durcissent par trempe, sont soudables à chaud, faciles à forger, ont une bonne usinabilité et de bonnes caractéristiques mécaniques à température élevée ($Ni < 7\%$), et résistent moins à la corrosion que les précédents.

Applications : composants divers (toutes industries), couteaux, ressorts...

- **Aciers inoxydables à durcissement par précipitation**

Comme les martensitiques en plus résistants à la corrosion.

I.4 Fontes

Leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes. A cause du pourcentage élevé de carbone qu'elles contiennent, entre 2 et 4 %, elles sont en

général assez fragiles, peu ductiles (inadaptées aux déformations à froid : forgeage, laminage...) et difficilement soudables.

II.4.1 Fontes à graphite lamellaire EN-GJL « FGL »

Les plus économiques, les plus utilisées, ce sont les fontes de moulage par excellence. Le carbone se présente sous forme de fines lamelles de graphite qui lui donne une couleur «grise».

Propriétés : bonne coulabilité ; bonne usinabilité grande résistance en compression et grandes capacités d'amortissement des vibrations. Norme NF EN 1561.

Applications : bâtis de machine, supports, carters, blocs-moteur...

II.4.2 Fontes à graphite sphéroïdal EN-GJS « FGS »

Ce sont les plus utilisées après les fontes à graphite lamellaire, obtenues par addition de petites quantités de magnésium juste avant moulage ; le graphite s'agglomère pendant le traitement sous forme de nodules ou sphères. Norme NF EN 1563.

Propriétés : ductilité, résilience et usinabilité.

Applications : vilebrequins, arbres de transmission, pièces de voirie, tuyauteries...

II.4.3 Fontes malléables EN-GJMW et GJMB « FMB et FMN »

Elles sont obtenues par malléabilisation de la fonte blanche– sorte de recuit – et ont des propriétés mécaniques voisines de celles de l'acier. Elles peuvent être moulées en faibles épaisseurs et sont facilement usinables.

Applications : carters, boîtiers... NF EN 1562.



Figure I. 10. Microstructures des fontes usuelles.

Principales fontes

Désignation normalisée	R _e (daN /mm ²)	R _r (daN /mm ²)	E (GPa)	HB dureté	A%
Fontes à graphite lamellaire					
EN-GJL150	10	15	80	160	0.8
EN-GJL120	13	20	100	190	à
EN-GJL250	17	25	110	210	0.3
EN-GJL300	20	30	120	230	
EN-GJL350	23	35	130	260	
EN-GJL400	26	40	140	290	
Fontes à graphite sphéroïdal					
EN-GJS 400-15	25	40	165	170	15
EN-GJS500-7	32	50	à	210	7
EN-GJS600-3	37	60	170	230	3
EN-GJS700-2	42	70		260	2
EN-GJS800-2	48	80		300	2
EN-GJS900-2	60	90		330	2
Fontes malléables					
Cœur blanc EN-					
GJMW360-12	19	38		200	12
GJMW400-12	22	40		220	5
GJMW450-12	26	45		220	7
Cœur noir EN-					
GJMB350-10	20	35	170	150	10
GJMB380-18	25	38		150	18
GJMB450-6	27	45		180	6
GJMB550-4	34	55		210	4
GJMB650-2	43	65		240	2

Tableau I.3. Principales fontes

I.4.4 Autres familles des aciers et fontes

- Aciers à outils : aciers rapides ; exemples : X160CrMoV12(Z160CDV12).
- Aciers réfractaires : pour hautes températures ; exemples : X12NiCrSi35-16, X8CrNi25-11(austénitiques) ; X10CrAlSi13, X18CrN28(ferritiques)...

- Aciers Maraging : très hautes résistances pour l'aéronautique, R_p proche de 200 daN/mm² ;
- Aciers Hadfields : au manganèse ; très grande résistance à l'usure la dureté superficielle peut atteindre 500 HB sous l'effet des chocs ; exemple X120Mn12 (Z120M12).
- Aciers pour roulements, pour appareils à pression...
- Fontes blanches (FB) : à base de perlite et de cémentite (carbures Fe₃C), elles sont très dures, fragiles, résistantes aux frottements, à l'abrasion et aux températures élevées. Difficiles à usiner, les applications sont limitées.
- Fontes alliées : elles peuvent être à graphite lamellaire, sphéroïdal ou blanches (EN- GJN) et sont destinées à des usages particuliers. Principaux éléments d'addition : nickel, cuivre, chrome, molybdène et vanadium. Ces éléments contrôlent plus ou moins la formation du graphite et développent des propriétés particulières.

Chapitre II :

Généralités sur les Procédés de soudage

II.1 Introduction:

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

II.2 Procédés desoudage

Ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre peuvent être classés comme présenté dans la figure II.1.

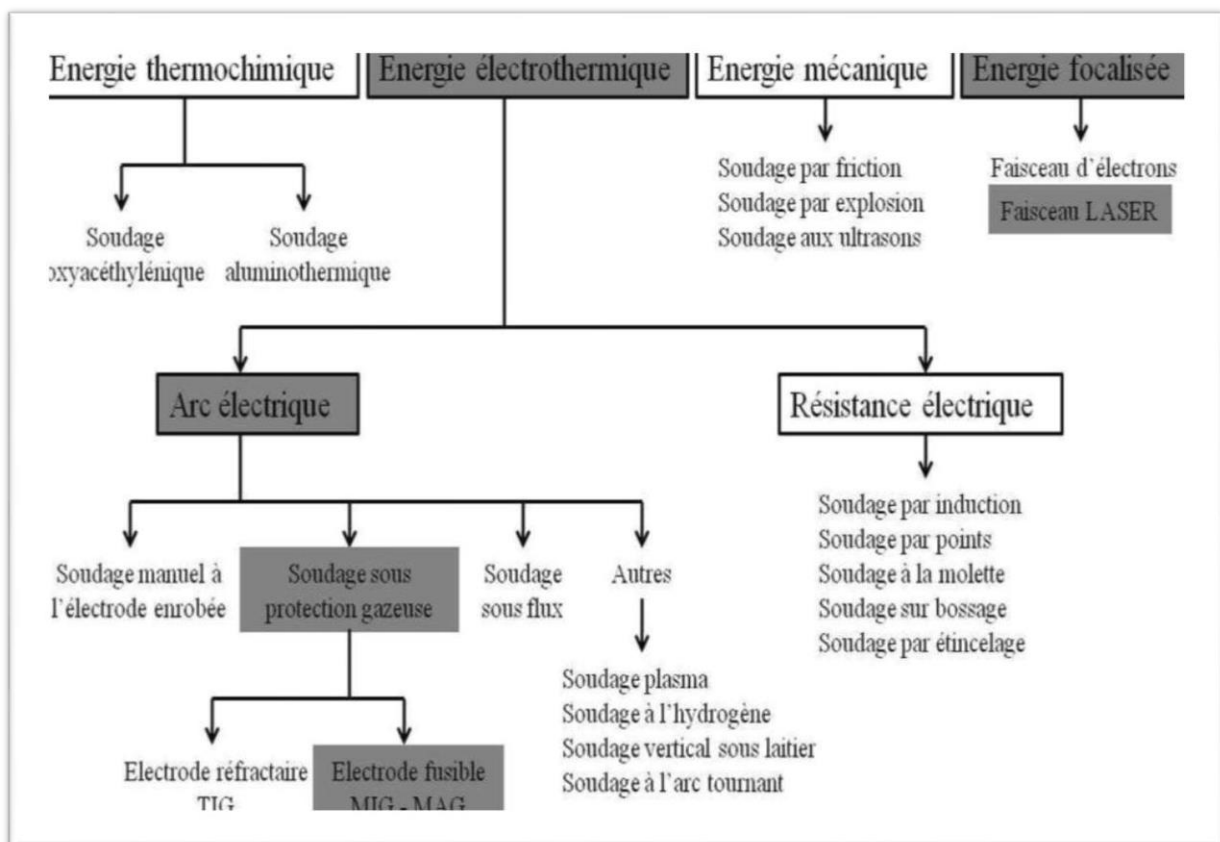


Figure II.1 : Classifications des procédés de soudage

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que:

- Le type d'énergie mise en œuvre;
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur);
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide);
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser.

D'une manière très globale on classe les procédés de soudage des aciers sous deux importantes catégories :

II.2.1 Soudage par pression:

Le soudage par pression (Figure II.2.), regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage .

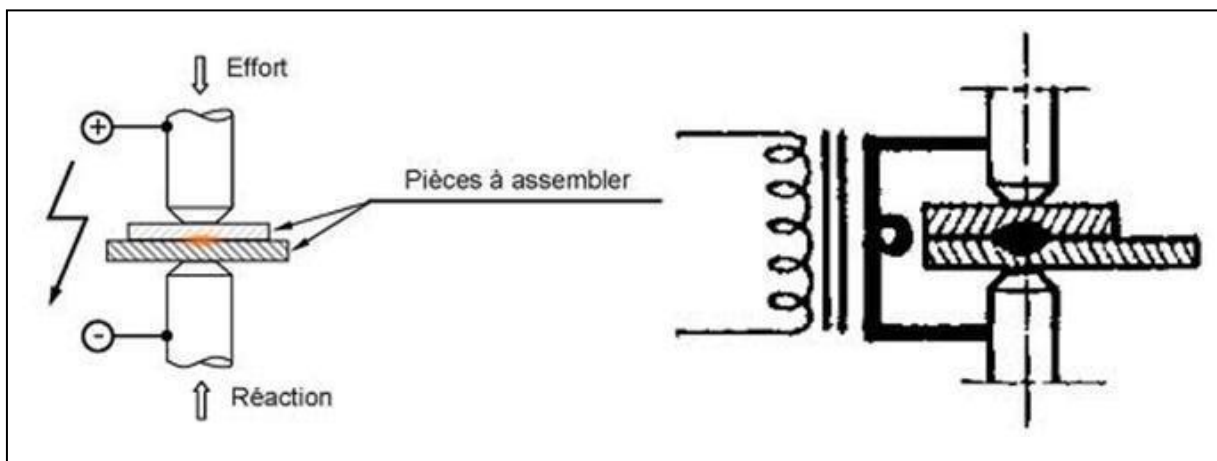


Figure II.2 : Principe de soudage par pression.

II.2.2 Soudage par fusion:

Dans cette classe l'assemblage se fait par la fusion locale du métal. Cette fusion est assurée par les différents types d'énergies électriques ou chimiques...

Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :

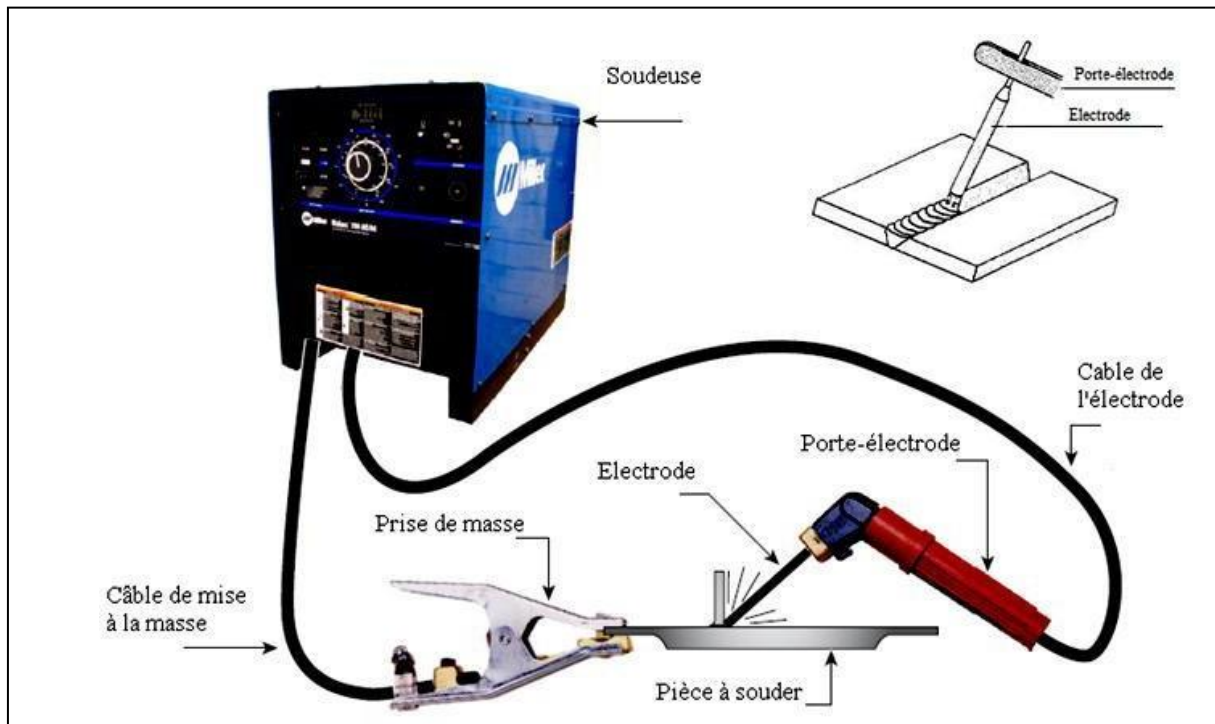
- Soudage à l'arc électrique;
- Soudage à l'arc sous gaz de protection ;
- Soudage par jet de plasma;
- Soudage sous flux.

II.2.2.1 Soudage à l'arc électrique

II.2.2.1.1 Généralités sur l'arc de soudage

On appelle arc de soudage une décharge électrique de longue durée qui se produit dans un mélange de gaz et de vapeurs ionisé entre deux électrodes et qui est caractérisée par une densité de courant élevée et par une faible différence de potentiel. Par une décharge électrique on entend le passage du courant électrique à travers un milieu gazeux. Il y a plusieurs formes ou types de décharges électriques : en arc, à lueur, par étincelles, décharge orageuse (éclair) et autre caractérisée par leur durée, tension, intensité de courant et autres paramètres.

II.2.2.1.2 Principe de soudage à l'arc électrique



C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder (Figure II.3.).

Figure II.3 : Principe de soudage à l'arc électrique .

L'effet thermique provoque la fusion aussi bien de l'électrode que du métal de base, pour amorcer un arc il faut que le courant parcoure un circuit fermé d'une part la pièce et de l'autre l'électrode.

Les procédés de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

- Le soudage avec électrode enrobées;
- Le soudage avec électrode réfractaire TIG;
- Le soudage automatique sous flux;
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG.

II.2.2.2 Le soudage avec électrodes enrobées

Un arc électrique établi entre une électrode et les bords des pièces à assembler, provoque leur fusion et crée un bain de métal liquide reçoit les gouttes de métal de

l'électrode (Figure II.3). L'arc résulte du passage d'un courant électrique intense à travers une atmosphère de gaz ou de vapeur, normalement non-conductrice. Les électrons circulent de la cathode (pôle négatif) vers l'anode (pôle positif) que constituent l'extrémité de l'électrode et l'impact de l'arc sur la pièce : la polarité est choisie ionisée ne représente qu'une faible part d'énergie calorifique mais irradie surtout des rayonnements électromagnétique (lumière visible, ultra violettes,...).

La tâche anodique et surtout la tâche cathodique, où se présentent les ions positifs, fournissent l'ensemble essentiel de la chaleur. La tâche anodique, bombardée par les électrons est par contre à une température plus haute (3500°C) que celle de la tâche cathodique (2400°C).

Cette situation est permanente en courant continu ; elle s'inverse à chaque alternance en courant alternatif. Le réamorçage s'obtient dans la mesure où l'anode, devenue cathode, reste suffisamment chaude pour devenir émettrice.

Les électrodes de soudages sont constituées par (Figure II.4):

- Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant dont la fusion forme le métal déposé;
- Un enrobage concentrique à l'âme dont la composition permet de remplir plusieurs rôles:
 - Stabilité électrique de l'arc;
 - Protection du métal en fusion;
 - Apport d'éléments dans le métal déposé

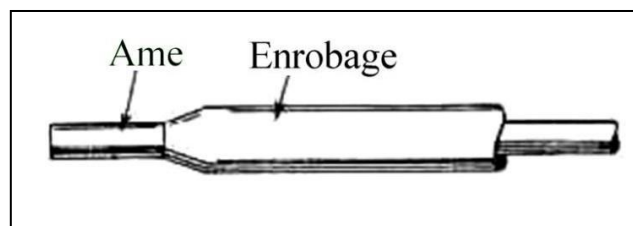


Figure II.4 : L'électrode enrobée.

L'atmosphère créée lors de la fusion de l'enrobage isole le métal liquide de l'oxygène et de l'azote de l'air. Chaque goutte de métal est entourée d'une protection de laitier qui viendra ensuite surnager sur le bain de fusion en formant aussi le départ des gaz occlus.

Au cours de la fusion, certains constituants plus volatils ont tendance à disparaître, comme le manganèse, l'enrobage compense alors ces pertes. De surcroît, l'enrobage fournit des constituants nouveaux (molybdène, nickel...). Le laitier modifie également la tension superficielle du métal liquide, donnant au cordon une forme plus ou moins concave .

II.2.2.3 Soudage à l'arc sous gaz de protection procédéTIG

Le TIG produit des assemblages d'un aspect irréprochable, qui dans bien des cas, ne nécessitent aucune reprise ultérieure. De plus, autre aspect non négligeable, ce procédé s'applique à des matériaux aussi divers que les aciers au d'aluminium et de cuivre.

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungstène Inert Gas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par (G.T.A.W : Gas Tungstène Arc Welding) (Figure II.5.).

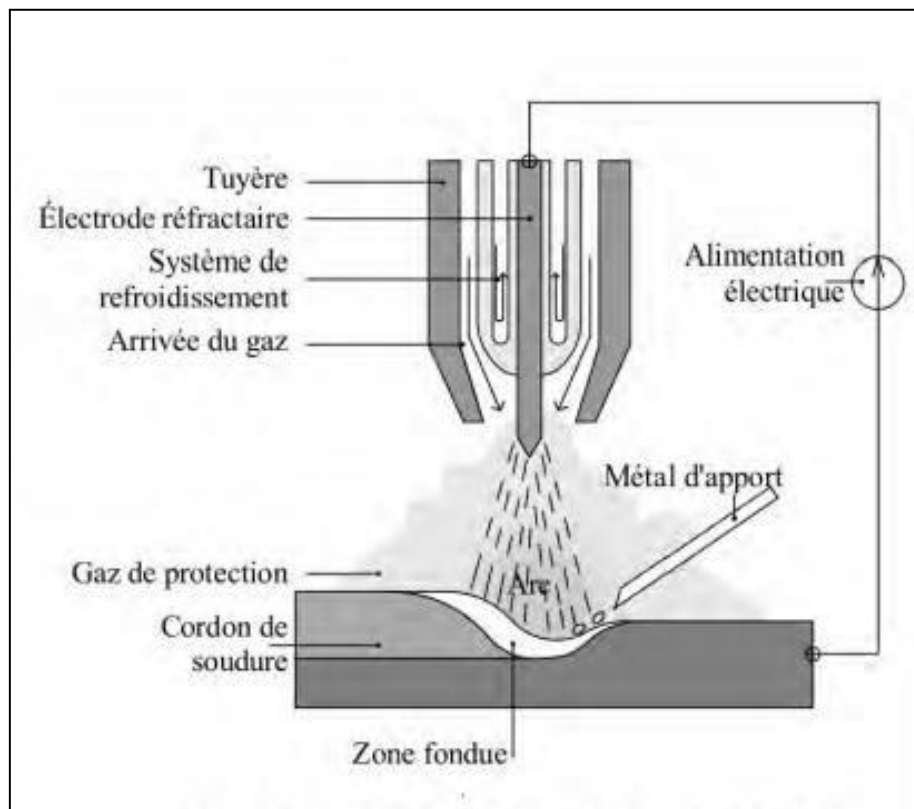


Figure II.5. Principe de soudage TIG.

Les gaz inertes utilisés sont soit de l'argon, soit de l'hélium soit des mélanges argon-hélium. L'argon, de qualité commerciale « soudage », est le gaz le plus utilisé car il convient après que tous les cas d'application.

L'hélium, plus couteux que l'argon, est utilisé lorsque l'on peut tirer profit du fait qu'il permet de plus grandes vitesses de soudage et une pénétration plus profonde. Quant aux mélanges (généralement à 25%, 50% ou 70% hélium dans l'argon), ils sont destinés à réaliser un compromis performance-prix.

Dans ce procédé, illustré sur la figure II.5, l'arc électrique est créé entre une électrode de tungstène et la pièce métallique dans un gaz de protection inerte (c.-à-d. non réactif). L'électrode est incluse dans la torche de soudage. Cette torche comprend également un système de refroidissement et l'arrivée du gaz de protection. Un apport de métal extérieur à l'aide d'une baguette est possible mais non obligatoire. Cette technique permet de souder quasiment tous les aciers pour de très faibles à faibles épaisseurs (de 0,5 à 10 mm). Elle est adaptée pour une position de cordon de soudage horizontal ou vertical ascendant. La vitesse de soudure est faible (environ $0,2 \text{ m.min}^{-1}$). Les soudures sont de bonne qualité et de grande précision, et sont adaptées à la construction aéronautique.

II.2.2.4 Soudage sous flux enpoudre

Le soudage électrique à l'arc sous flux solide (Submerged Arc Welding « SAW ») électro-conducteur est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil électrode d'apport de métal (de \varnothing 1,2 à \varnothing 6 mm) dévidé à une vitesse constante et la pièce à souder. Un dépôt continu de flux en poudre (parfaitement étuvé et de granulométrie homogène) recouvre l'extrémité du fil électrode et la pièce à souder. L'arc de soudage et le bain de fusion sont non visibles pendant le soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler, le fil électrode et une partie du flux en poudre pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier solidifié protecteur.

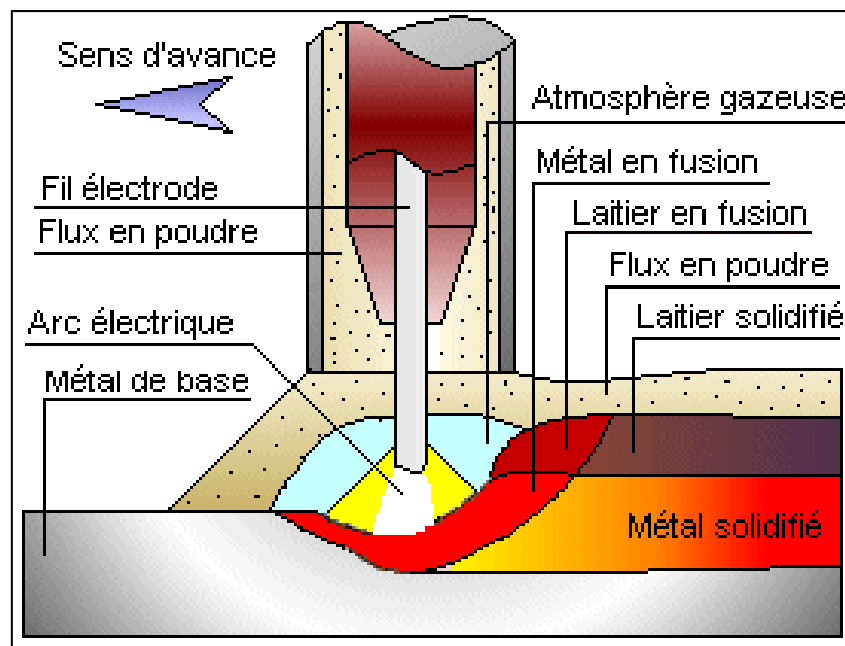


Figure II.6 : Soudage sous flux en poudre

Le procédé de soudage est essentiellement utilisé en installation automatique sur banc ou potence de soudage. Il est principalement utilisé pour le soudage à plat. La bobine de fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatique et le fil est déroulé du dévidoir à la sortie de la buse de la tête de soudage. La tête de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie généralement positive du générateur de soudage à courant continu. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. Une trémie branchée par une dérivation sur la tête de soudage l'alimente par la poudre. L'arc jaillit lorsque l'opérateur actionne le bouton électrique du coffret de commande et que la pointe du fil électrode touche la pièce à souder. Le flux en poudre non fondu est récupéré à l'aide d'un aspirateur et le flux est recyclé après tamisage.

II.2.2.5 Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG

II.2.2.5.1 Définition et principe du soudage MIG-MAG

Découvert au cours de la deuxième guerre mondiale, le développement du procédé MIG-MAG (nommé aussi Gaz Metal Arc Welding, GMAW) visait à réduire le coût de soudage des matériaux épais. Il s'est vite imposé dans l'industrie en raison de son efficacité au regard des soudures importantes.

Enfin, comparativement au procédé TIG, déjà employé à l'époque, le procédé MIG-MAG s'est aussi révélé plus rapide, notamment sur les matériaux plus épais. Aujourd'hui, ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de la fabrication en général.

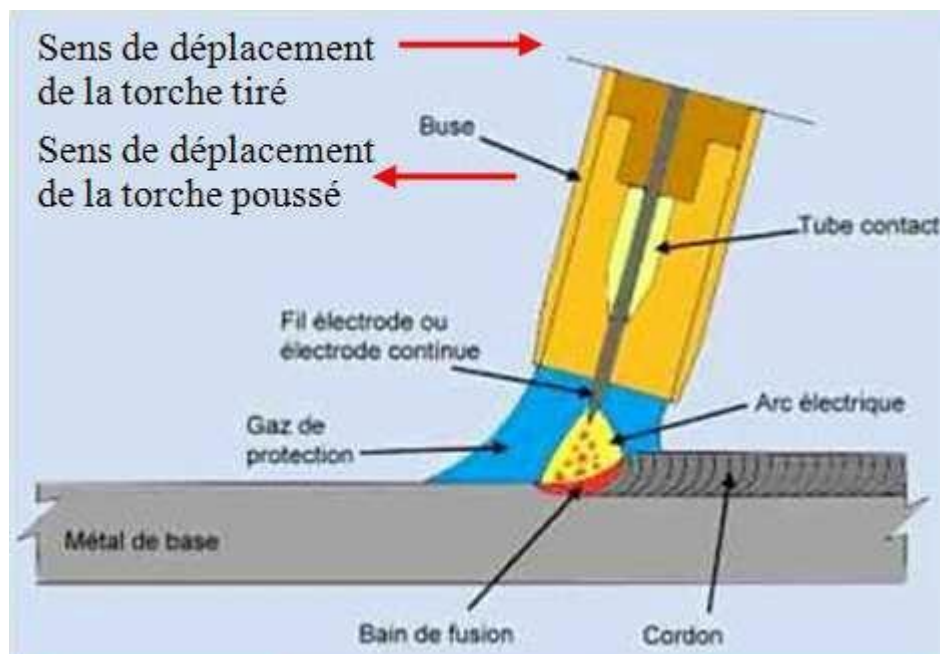


Figure II.7 : Procédés de soudage MIG/MAG

La fusion est obtenue grâce à un arc électrique s'établissant entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base (Figure II.6). Un gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage. La chaleur que dégage l'arc provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Différentes formes de gouttelettes de métal fondu, projetées du fil-électrode vers le bain de fusion où elles se solidifient, produisent la soudure désirée. Le fil-électrode, généralement de petit diamètre, est continuellement amené à l'arc de soudage, par un mécanisme de dévidage, où il fond sous l'effet de la chaleur qui y est générée.

Selon la nature du gaz de protection employé, le procédé GMAW se divise en deux catégories et est désigné par un acronyme spécifique. Ainsi, on distingue :

- Le procédé MAG (Métal Active Gaz) qui utilise un gaz actif. Il peut s’agir de gaz carbonique (CO₂), d’un mélange d’argon et de gaz carbonique (Ar-CO₂) ou d’un mélange d’argon et d’oxygène(Ar-O₂).
- Le procédé MIG (Métal Inerte Gaz) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l’argon (Ar), de l’hélium (He) ou un mélange d’argon et d’hélium(Ar-He).

Le soudage à l’arc électrique sous protection gazeuse avec fil plein présente de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients qui sont synthétisés dans le tableau suivant (Tableau II.1) :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Forteproductivité. - Grande vitesse de soudage (gain detemps). - Taux de dépôt de métalimportant. - Limitation desdéformations. - Nombre de reprises de soudurelimité. - Pas de laitier àenlever. - Large gammed'épaisseur. - Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiquesmécaniques. - Soudage dans toutes lespositions. - Contrôle aisé de la pénétration enrégime decourt-circuit. - Aspect de cordoncorrect. - Procédé automatisable. - Fatigue moindre dusoudeur 	<ul style="list-style-type: none"> - Entretien fréquent etminutieux. - Difficile à utiliser dans les endroits exigus et peu pratique pour les applications quiexigent un grand déplacement de la torche entre deuxsoudures. - Les économies de temps réalisées avec ces procédés peuvent être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate. En effet, la vitesse de soudage élevée exige des précautions additionnelles et demande au soudeur de réagir très vite. Ainsi, le fil peut demeurer figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre letravail.

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients du soudage MIG-MAG

Les procédés de soudage à l’arc utilisent comme moyen de chauffage l’énergie d’un arc électrique que l’on crée entre une électrode et les pièces à assembler. Dans un milieu gazeux, entre deux électrodes (une anode reliée au pôle positif d’une source de courant et unecathode

connectée au pôle négatif) portées à un potentiel convenable, il est possible d'amorcer et de maintenir un arc électrique. En frottant les électrodes entre elles et sous l'effet de la différence de potentiel, des électrons jaillissent de la cathode et sont attirés vers l'anode.

Ces électrons s'accélèrent sous l'action du champ et ionisent les atomes du gaz environnant, le rendant ainsi conducteur. En écartant l'électrode de quelques millimètres, le processus s'entretient en créant une réaction en chaîne et crée un arc continu. L'arc se compose de trois zones :

- **La tâche cathodique** qui reçoit les ions positifs et qui est émettrice d'électrons. Il en résulte une brusque variation de potentiel à proximité de la cathode.
- **La tâche anodique** qui est soumise au bombardement électronique. La variation de potentiel est là aussi très brusque.
- **La colonne d'arc**, dite aussi colonne de plasma, qui relie les deux tâches en formant un conducteur gazeux. Dans cette partie de l'arc, la chute de tension est faible et linéaire.

II.2.5.2 Le transfert de métal

Le soudage à l'arc de type MIG-MAG étant toujours alimenté en courant continu avec polarité inverse, l'électrode fusible est reliée au pôle positif. Le fil est alors soumis au flux d'électrons, ce qui favorise la fusion. Le choix de la polarité inverse s'explique par une plus grande stabilité de l'arc. En effet, dans le cas d'une polarisation directe, les gouttes de métal sont plus grosses et se détachent moins facilement, ce qui conduit à l'obtention d'un cordon bombé [6].

A partir de ce type d'alimentation, le transfert de métal dans l'arc peut s'effectuer de plusieurs façons selon la nature du gaz de protection, la tension et l'intensité de l'arc (Figure II.7). On dénombre trois modes de transfert de base :

Le transfert par court-circuit : Obtenu à faible énergie d'arc (<200 A et 14 à 20 V), il se caractérise par la formation d'une goutte en bout de fil venant en contact avec le bain liquide. Le courant augmente alors rapidement, faisant apparaître un pincement facilitant le détachement de la goutte. Cette technique permet de souder de faibles épaisseurs grâce à une grande maîtrise du bain de fusion mais conduit à un arc court et instable et à des projections de métal sur les pièces soudées (Figure II.8a).

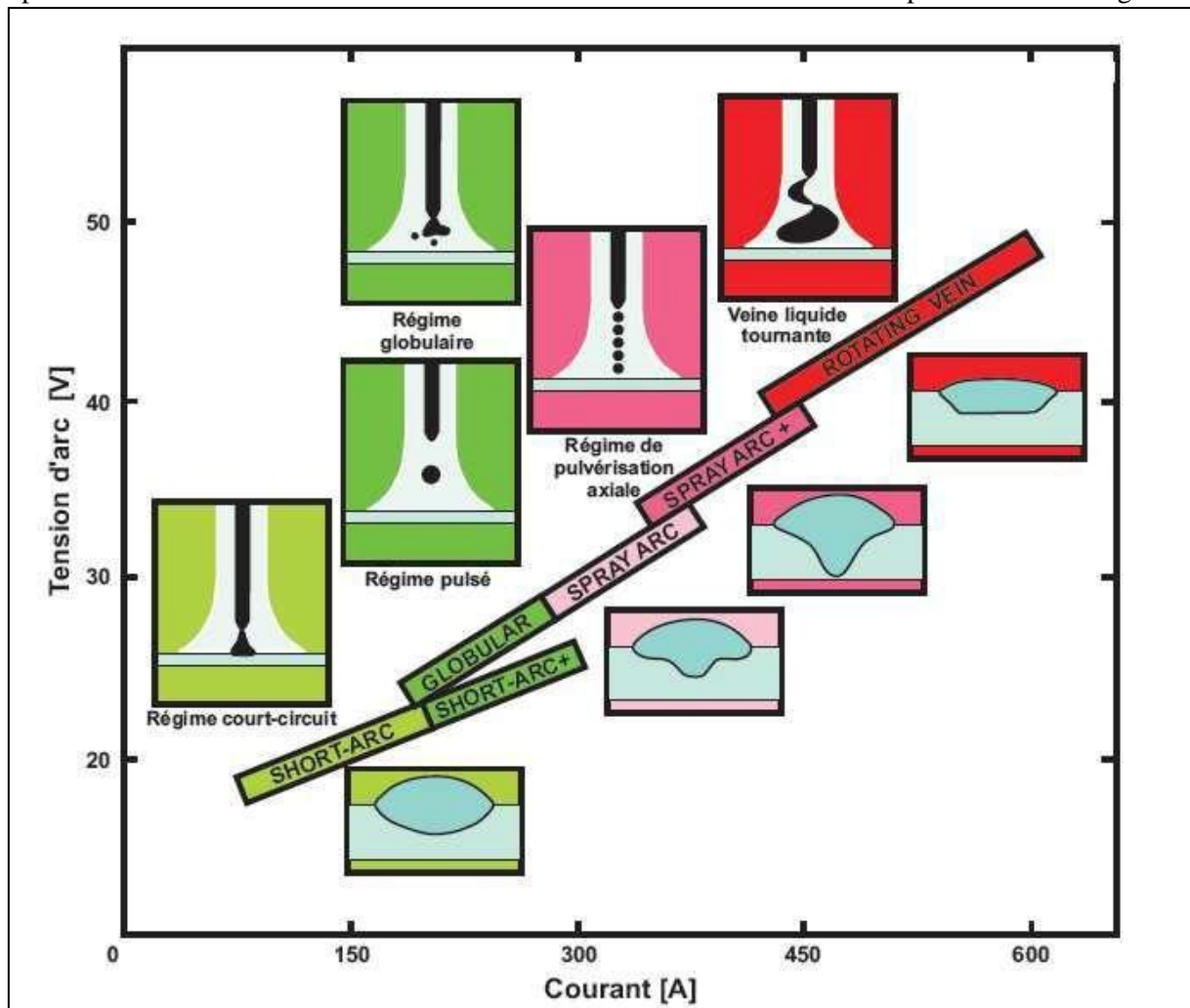


Figure II.8 : Influence de la tension et de l'intensité du courant sur le régime de transfert de métal en soudage MIG dans l'argon

Le transfert par pulvérisation axiale : Dans le cas des grandes énergies ($>$ à 25 V et à 250 A), l'extrémité du fil présente un cône allongé. Le transfert se produit sous forme de fines gouttelettes dont le diamètre est inférieur à celui du fil et qui sont projetées à grande vitesse sur la pièce. Ce mode autorise une grande profondeur de pénétration et des volumes de métal déposés importants (Figure 8b).

Le transfert globulaire : Compris entre les deux modes précédents, il se caractérise par une croissance lente des gouttes. L'intensité n'étant pas suffisante pour expulser la goutte, celle-ci va grossir jusqu'à tomber sous son propre poids. La goutte suit alors une trajectoire aléatoire qui n'est pas toujours dans l'axe de l'arc. Ce mode, instable, conduit à de faible profondeur de pénétration et à de nombreuses projections (Figure 8c).

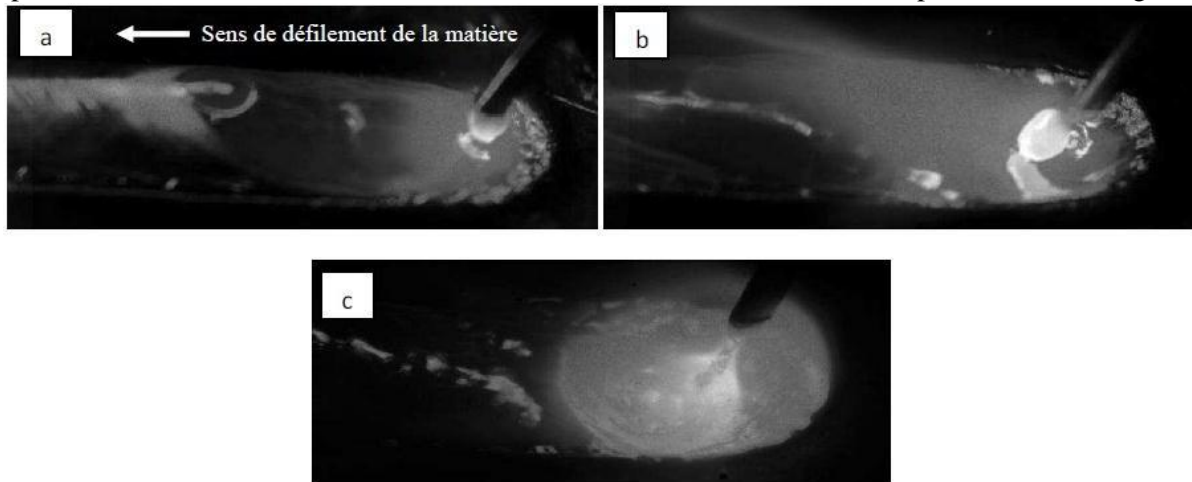


Figure II.9 : Observation à la caméra rapide des 3 régimes de transfert du soudage MAG : a- court-circuit (146 A, 16 V), b- globulaire (220 A, 19 V), c- spray (365 A, 27,8 V) .

A ces trois modes de transfert de base, il faut ajouter les trois modes dérivés suivants :

Le régime pulsé : Un courant de base maintenant l'arc établi est associé à des pics d'intensité permettant le transfert d'une fine gouttelette. Ce mode de transfert présente les mêmes avantages que la pulvérisation axiale mais à courant moyen inférieur. Il permet de s'affranchir des problèmes liés au transfert globulaire lorsque les conditions exigent son utilisation.

Le transfert par court-circuit forcé : Le transfert par court-circuit ne permettant pas de souder à des vitesses importantes ($\leq 0,5$ m/min), et le transfert globulaire entraînant de grosses projections, les soudeurs ont souvent recours à ce mode dérivé. Avec une énergie d'arc située dans le domaine globulaire et un poste de soudage transistorisé, il permet de maintenir un transfert par court-circuit et d'accroître la vitesse de soudage tout en améliorant le profil de la pénétration.

Le transfert à veine liquide rotative : A très forte énergie de soudage, le transfert par pulvérisation axiale est soumis à des forces électromagnétiques importantes. Le métal en transfert se met alors à tourner formant une veine liquide rotative.

II.2.2.5.3 Le filélectrode

L'électrode est un fil de grande longueur, enroulé sur un touret ou une bobine isolante, dont le matériau correspond au métal à souder (acier doux ou allié, acier inoxydable, alliage d'aluminium ou de cuivre). L'entraînement du fil d'apport se fait par rotation de galets en général situés dans le poste à souder, à la sortie de la bobine. Les galets motorisés exercent une pression sur le fil et la rotation permet la circulation du fil dans le conduit de la torche.

Une pression trop importante des galets peut écraser le fil.

Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique qui a également pour rôle de faciliter l'arrivée du courant à son passage dans la torche. Des proportions importantes de silicium (0,3 à 1,2 %) et de manganèse (0,9 à 1,3 %) jouent un rôle désoxydant pour compenser les effets des gaz de protection actifs. Les diamètres normalisés vont de 0,6 à 2,4 mm, voire 3,2 mm .



Figure II.10 : Le fil électrode

II.2.54 Protection gazeuse

La protection gazeuse est, selon le cas, inerte ou active et oxydante (les protections réductrices sont peu utilisées). C'est ce qui établit la distinction d'appellation MIG (inerte) ou MAG (actif) dans l'utilisation du procédé, le matériel de soudage ne présentant pas, par ailleurs, de différences notables. Les protections gazeuses communément employées sont données dans le tableau II.1

Procédé	Gaz	Applications
MIG	Ar	Tous métaux en principe
	He	Alliages d'aluminium
	Ar + He	Alliages d'aluminium et de nickel
MAG	Ar + 1 à 2 % O ₂	Aciers au carbone avec fils désoxydants
	Ar + 3 à 5 % O ₂	
	Ar + 20 à 30 % CO ₂	
	Ar + 5 % O ₂ + 15 % CO ₂	
	CO ₂	
	CO ₂ + 5 % O ₂	

Tableau II.2 : Protections gazeuses utilisées en soudages MIG et MAG

II.3 Les différentes zones d'un assemblage soudé

La soudure se décompose en plusieurs zones (Figure II.10.) :

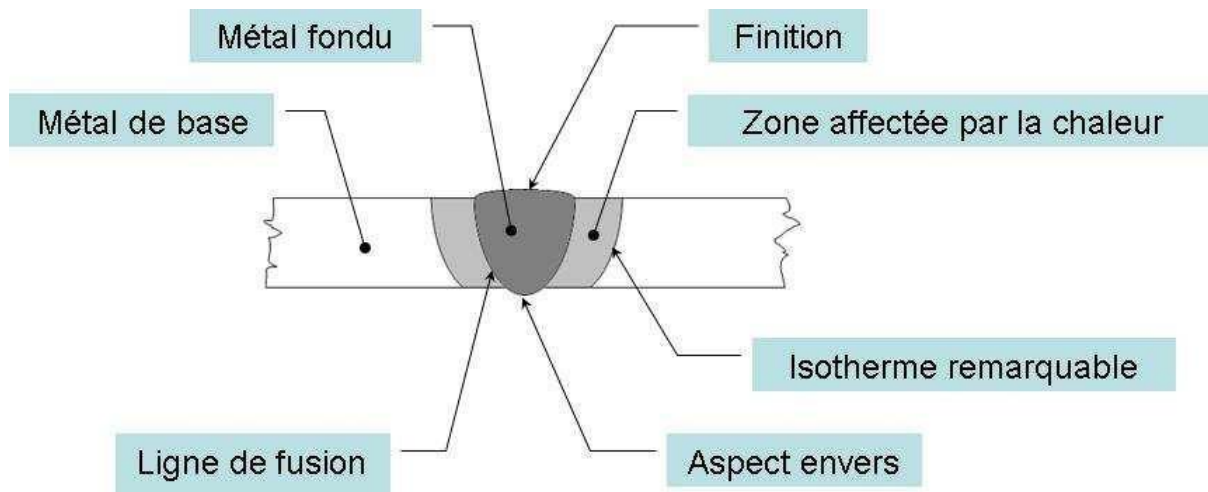


Figure II.11: Cordon de soudure

II.3.1 La zone fondue (nommée ZF)

La zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus chaude vers la moins. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

II.3.2 La zone affectée thermiquement : (nommée ZAT)

La zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

II.3.3 La zone de liaison

Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

II.3.4 Le métal de base

Au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante

pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celle du métal de base et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage.

Le cycle thermique résultant est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique des matériaux, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile.

Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :

- ✓ Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques,...
- ✓ Le couple métal d'apport - gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.
- ✓ L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone thermiquement affectée.

II.4 Aspect thermique lié au soudage

En règle générale, les opérations de soudage modifient profondément les structures métallurgiques et les propriétés locales des pièces assemblées. Dans certains cas extrêmes, elles peuvent être à l'origine de défauts tels que fissures, porosités ou une fragilisation locale. Il importe donc de bien connaître l'influence de différents facteurs tels que les cycles thermiques de soudage et la composition chimique des pièces à assembler. En dépit de leur grande diversité, les procédés de soudage ont pour caractéristiques communes la localisation de l'apport de la chaleur. Une opération de soudage peut être donc décrite comme un passage bref à très haute température d'une petite quantité de matière suivi par un refroidissement, essentiellement par conduction dans les parties adjacentes. Le cycle thermique en tout point voisin de la zone soudée traduit ainsi l'évacuation de la chaleur correspondant au soudage, et dépend donc de variables liées au procédé, au matériau et à la géométrie de l'assemblage. En effet, la ténacité augmente tout d'abord avec l'épaisseur des éprouvettes et diminue ensuite,

dès qu'une valeur critique d'épaisseur est atteinte. Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage, c'est-à-dire ayant été chauffé à une température inférieure au point de transformation A_{c1} (cessation des états hors équilibre). À l'équilibre, il s'agit donc d'une structure composée de ferrite α (solution solide d'insertion de carbone dans le fer, de structure cubique centrée) et de cémentite ou plus précisément de perlite, agrégat de ferrite et de cémentite .

Une zone subcritique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Cependant, lorsque la température atteinte est suffisamment importante (par exemple $T > 600$ °C), certains phénomènes tels que le revenu, la globalisation, des lamelles de cémentite, recristallisation dans le cas du soudage pour produit écroui, le vieillissement, peuvent éventuellement intervenir. Le cycle thermique dans les assemblages soudés joue un rôle prépondérant dans les performances atteintes par cet assemblage. En effet, il conditionne l'élaboration de la zone fondue, les modifications de structures dans la zone thermiquement affectée ou la zone affectée par la chaleur (ZAT ou ZAC) comprise entre l'isotherme limitant le métal fondu et l'isotherme correspondant à la disparition de tout effet du chauffage sur la structure métallurgique du métal de base (figures II.5 et II.6).

- 1- Région où le métal de base n'a pas atteint une température de 600°.
- 2- Entre 600 °C et A_{c1} , quelques modifications apparaissent.
- 3- Entre A_{c1} et A_{c3} , l'austénitisation partielle du métal donne une structure à grain très fin.
- 4- Entre A_{c3} et 1200 °C environ : structures de normalisation et structure plus grossières.
- 4- Au-delà de 1200 °C, au contact de la zone fondue (zone de liaison), une structure à gros grains .

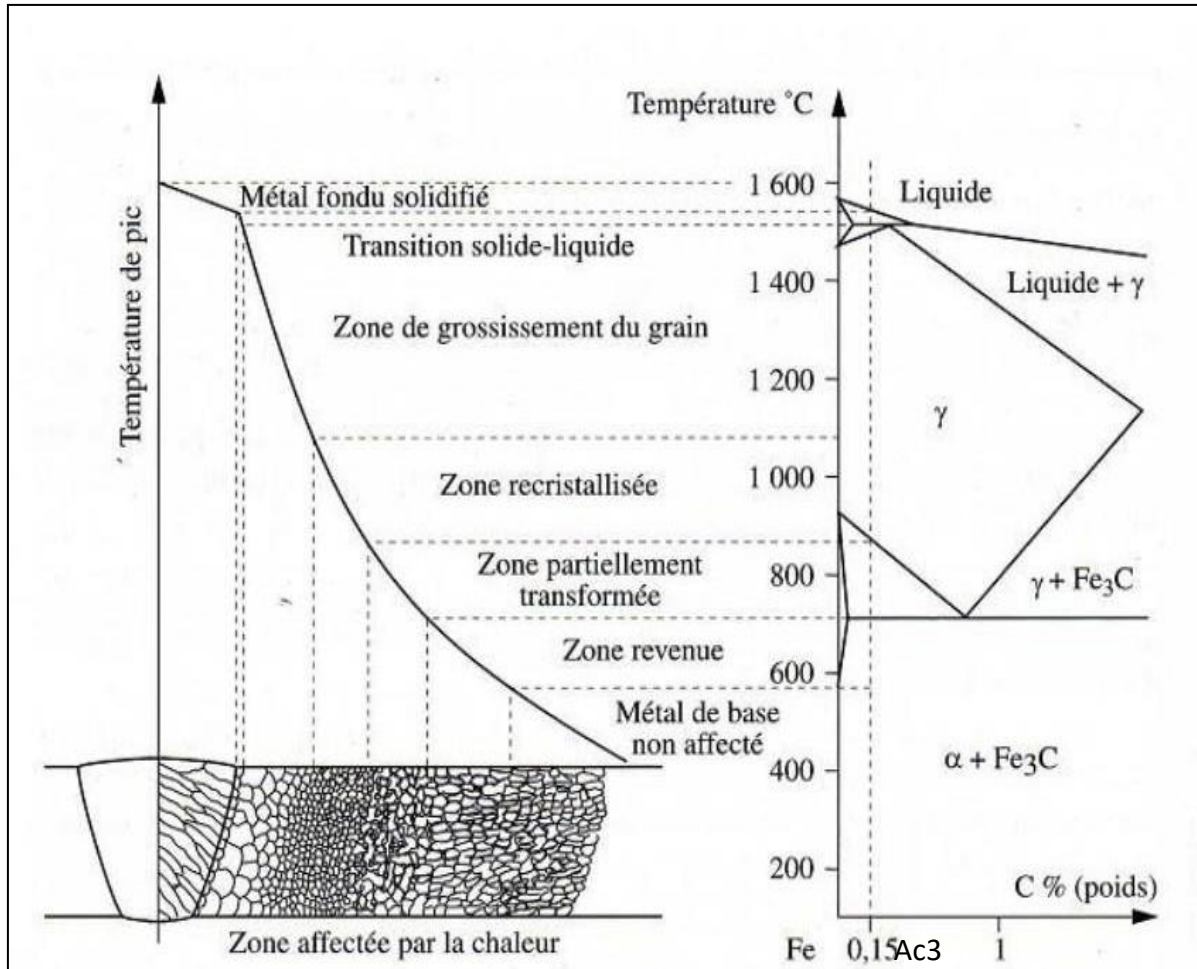


Figure II.12: Zone d'acier considéré à 0,15 %C et cycle thermique lors du soudage

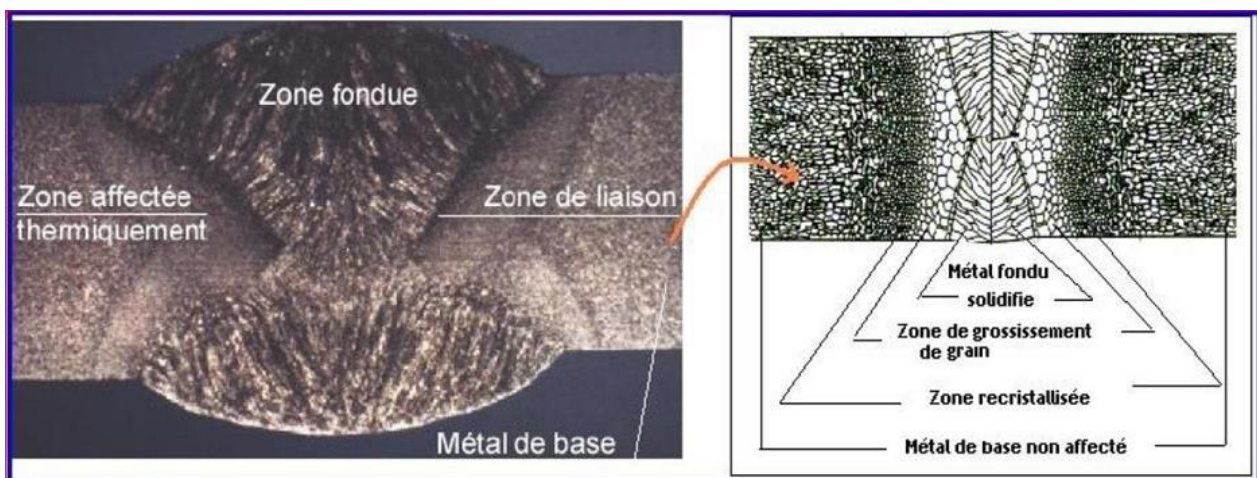


Figure II.13: Les zones de grossissement, recristallisé, affecté et non affecté .

II.5 Les défauts desoudures

La majeure partie des discontinuités se produise dans les joints ou dans la ZAT, les soudures comportent des porosités, des inclusions, scories d'impuretés ou des fissures. Parmi ces trois défauts, les fissures sont de loin les plus déterminantes. S'il y a des limites acceptables pour les inclusions et les porosités, les fissures restent inadmissibles.

II.5.1 Les inclusions gazeuses

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes. Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes (Fig.34.ab&c.) :

- a) Porosités vermiculaires.
- b) Porosités uniformes



Figure II.14: Inclusions gazeuses

II.5.2 Inclusion solides

Des inclusions solides peuvent être de trois types différents (Fig.35.a .b & c) :

- a) Laitier.
- a) Tungstène.
- b) Cuivre.

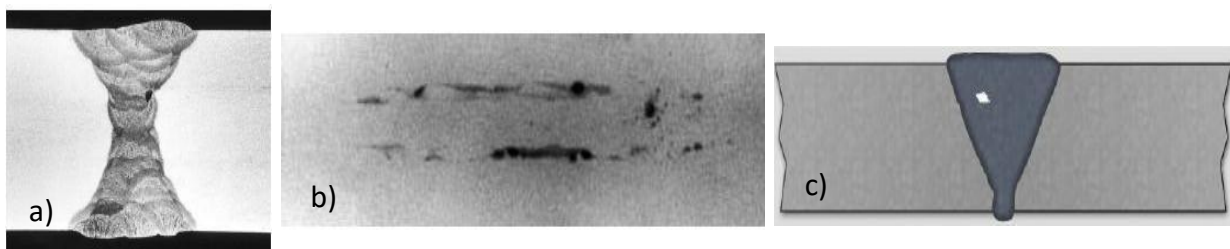


Figure II. 15 : Inclusions de : a) laitier, b) tungstène, c) cuivre

II.5.3 Les fissures

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. La fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. La figure 11 résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :

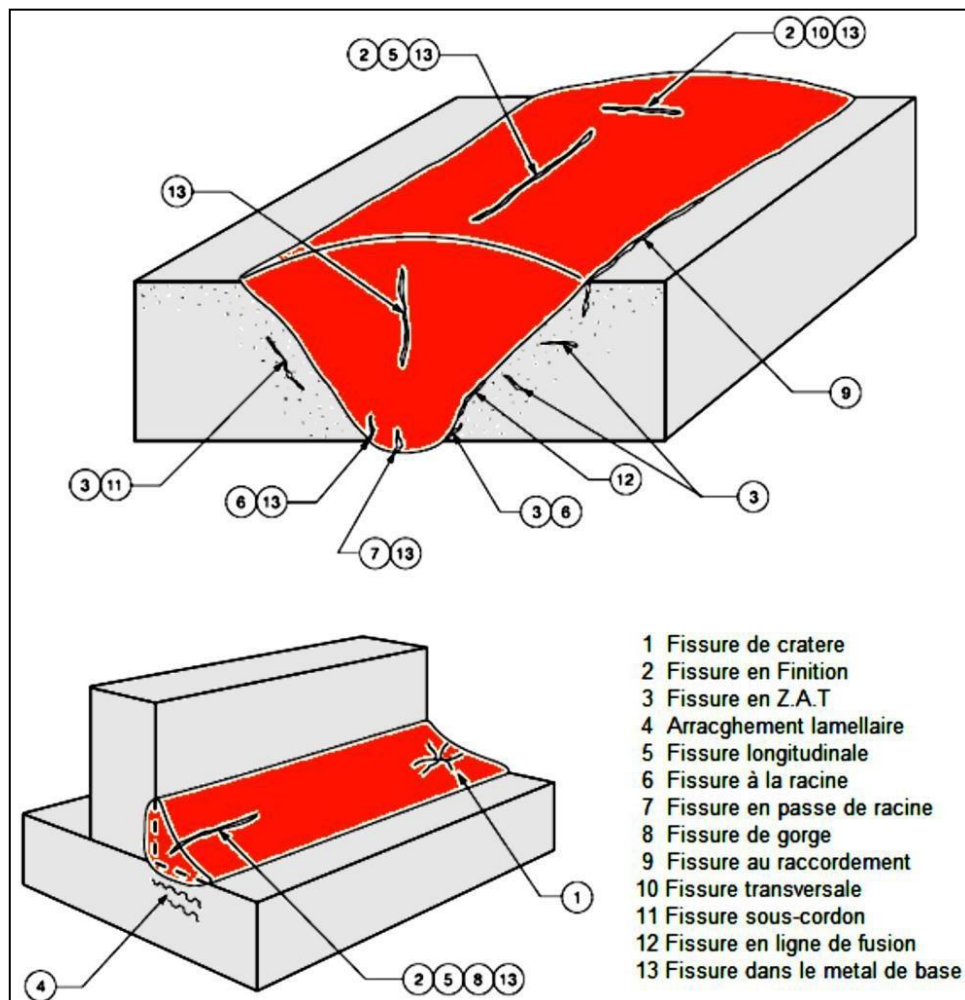


Figure II. 16 : Les types de fissure.

Les autres défauts de forme sont particulièrement nombreux, on citera rapidement quelques défauts :

- Sillons aux caniveaux et morsures ensurface,
- Retassures de cratère,
- Manque defusion,
- Manque depénétration,
- Excès de pénétration (Excès dematière),
- Recouvrements non fusionnés(Débordements),
- Dénivellement,
- Effondrement à laracine,
- Projections sur le métal debase.

Chapitre III :

Métallurgie sur les procédés de soudage

Chapitre III métallurgiques de soudage des aciers

III.Introduction :

Le soudage peut être défini comme étant un procédé d'assemblage, qui a pour but la création de la continuité physique entre deux éléments métalliques de telle sorte que l'assemblage réalisé satisfait en tout point aux exigences relatives à ses propriétés.

En soudage, on peut confronter deux situations :

- La première où les éléments à assembler ont la même composition chimique et le métal d'apport est tel que le cordon aura une composition très voisine de celle du métal de base, on dit alors que le soudage est «*homogène*», c'est le cas le plus fréquent.
- La deuxième où les éléments à assembler n'ont pas la même composition chimique ou, s'ils ont la même composition chimique, celle du métal d'apport est différente, on dit dans ce cas que le soudage est «*hétérogène*».

Pour la continuité physique, celle-ci peut être obtenue avec ou sans la fusion des métaux à assembler. On distingue alors le soudage sans fusion (avec diffusion à l'état solide obtenue avec les procédés de soudage par explosion, par pression ou diffusion apparente obtenue avec le soudage par point, à la molette, par bossage, par induction, par friction, ou ultra-sonique) et le soudage avec fusion obtenu par tous les procédés de soudage aux gaz, à l'arc, par faisceau d'électron, par laser, qui sont ceux utilisés dans la très grande majorité des cas d'application industrielle.

III.1 Notions sur la métallurgie du soudage:

L'étude de la métallurgie nous fait savoir que les caractéristiques des aciers sont fonction de leurs structures (nature, dimension, morphologie, et répartition

des constituants) et de leur composition chimique. La structure étant elle-même liée à la composition chimique et aux traitements thermiques que subit l'acier.

III.2 Considérations générales:

Le soudage par fusion et le coupage thermique nécessitent un chauffage localisé qui va engendrer des modifications structurales, des déformations et des contraintes qui se manifestent en cours d'opération ou parfois longtemps après.

III.2.a Déformation d'origine thermique:

Une barre de métal homogène de longueur L , chauffée uniformément se dilate de ΔL proportionnellement à l'élévation de température. Le coefficient de proportionnalité est appelé coefficient de dilatation linéaire.

L'homogénéité de la barre et le chauffage uniforme assurent la réversibilité de ces déformations, ce qui ne sera pas le cas en soudage où le chauffage est localisé.

D'après le tableau III.1, on constate que plus la température de fusion du métal est élevée plus, le coefficient de dilatation est faible. Ceci s'explique aisément en considérant les forces de liaison entre atomes, plus celle-ci sont élevées plus il faudra d'énergie pour détruire la liaison ou par agitation thermique accroître la distance entre atomes.

Métal	Pb	Zn	Mg	Al	Au	Cu	Ni	Fe	Ti	Mo	W
θ de fusion °C	327	419	650	658	1063	1083	1455	1530	1670	2570	3390
α à 20°C mm/m°C	27	29	25,4	23,2	16,2	16,5	12,5	11,8	8,5	4,9	3,2

Tableau III.1 : Température de fusion de quelques éléments métalliques couramment présent dans les aciers.

III.3 Caractéristiques de la soudure:

III.3 Définition:

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la

liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales (Fig.1)

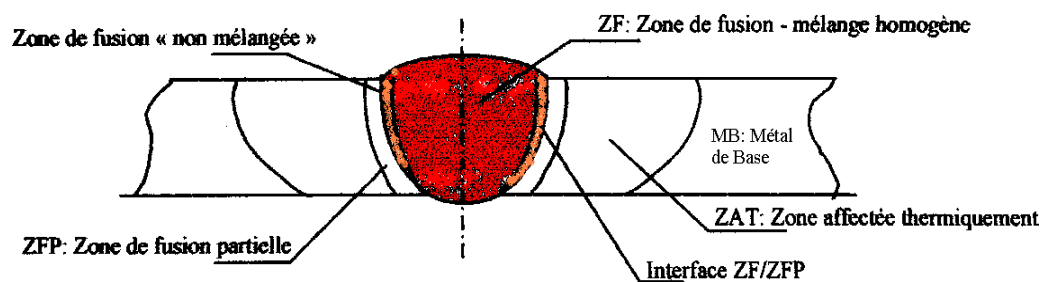


Figure III.1 : Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion .

La zone de fusion (ZF) est la région chauffée au-dessus de la température du liquidus. La structure du métal de base initiale est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage.

Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcés. La zone étroite à l'extrémité du bain de fusion est la zone « non mélangée » : dans cette zone les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides, la composition chimique est identique à celle du métal de base.

Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de

composition chimique différente du métal de base.

Le bain de fusion est délimité par l'interface de soudure qui est la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionné et le métal de la soudure solidifiée.

Directement adjacente à l'interface de soudure se trouve une zone de fusion partielle (ZFP), le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage.

Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grain, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle. La vraie zone affectée thermiquement (ZAT) est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base.

Finalement la seule partie de la pièce qui ne subit pas de modifications microstructurales est le métal de base non affecté. Bien que métallurgiquement inchangé, le métal de base, tout comme le joint de soudure global, est un lieu de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure.

III.3.a Morphologie de la zone de fusion:

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc ou du plasma permettant la fusion du métal qui sont liées aux paramètres technologiques du procédé, et les mouvements du bain de fusion.

Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage sont le siège de processus thermo physiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants selon la nature du procédé utilisé .

Aux abords immédiats de la zone fondue, le métal de base subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du joint soudé. La Figure 2 synthétise ces transformations:

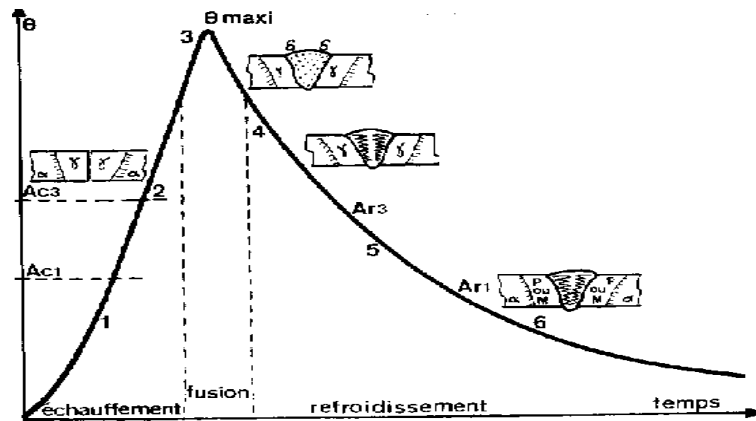


Figure III.2. Cycle thermique en soudage et transformations structurales.

1. Dilatation, plastification, Ac_1 : cessation des états horséquilibre.
2. Dilatation, plastification, Ac_3 : austénitisation (maille γ).
3. Dans la zone fondue: fusion, dilution du métal d'apport et du métal de base, dissolution de l'hydrogène (maille δ).
4. Solidification, formation des dendrites (maille γ), retrait, contraintes, Ar_3
5. Transformations allotropiques (M ou, M + F + C ou, F + C) diffusion de l'hydrogène, contraintes locales, Ar_1 , avec (M : Martensite, F : Ferrite et C :Cémentite).
6. Fin de transformation, contraction, contraintes résiduelles, dans certains cas, la fissuration à froid et la diffusion de l'hydrogène jusqu'à la température ambiante.

III.4.1 Structure globale de solidification:

Au cours du soudage par fusion la structure de solidification en zone de fusion se réalise à partir de la structure du métal solide des zones environnantes. La solidification s'établit à l'interface solide-liquide à partir des grains existant à cette interface, ces grains servent de substrats à partir desquels la croissance débute et se développe selon la direction du gradient maximum de température. Cette direction de croissance est celle de l'avancée du front de solidification afin de dissiper la chaleur latente de solidification vers le métal solide avoisinant.

La structure d'une soudure est fortement influencée par les cycles thermiques du soudage. La taille et la forme d'ancien grain bêta ainsi que les transformations de phase qui se produisent lors du refroidissement sont des caractéristiques essentielles qui définissent les propriétés mécaniques des assemblages.

Selon la nature des métaux de base à assembler et les cycles thermiques appliqués, les microstructures des cordons de soudure, des zones de fusion et des zones affectées thermiquement, vont présenter des différences de morphologie et des caractéristiques mécaniques.

III.4.1 Sous structure de solidification:

III.4.1.a Mécanisme de formation:

Les conditions de solidification hors équilibre pendant le soudage par fusion impliquent la déstabilisation du front plan solide-liquide avec la formation d'une sous structure de solidification.

Chaque grain colonnaire de la structure d'une soudure d'un alliage contient une sous structure de solidification sous forme cellulaire ou dendritique. Même si la composition globale de la soudure est homogène, les sous structures cellulaires ou dendritiques représentent des formes de micro-ségrégations.

La micro ségrégation est caractérisée par une différence de composition entre le cœur et la périphérie des cellules individuelles ou des dendrites cellulaires.

Les cellules sont des protubérances de métal solide microscopiques en

forme de crayon qui refroidissent en avant de l'interface solide-liquide. Les dendrites sont plus développées que les cellules et ont une forme d'arbre avec un bras de dendrite primaire et des branches orthogonales appelées bras de dendrite secondaires. Généralement, les paramètres importants contrôlant les sous structures cellulaires ou dendritiques dans les soudures sont:

- Le coefficient de partage à l'équilibre K qui indique le potentiel de ségrégation d'un alliage est: $K = C^*s / C^*L$

C^*s : concentration du soluté à l'interface solide-liquide. C^*L : concentration du liquide à l'interface solide-liquide.

- La composition de l'alliage elle-même (Co).
- Le gradient de température (G) dans le liquide à l'interface (en °C /mm).
- La vitesse de croissance ou vitesse d'avance du front de solidification à l'interface (R) (en mm / s).

Qu'elle soit planaire, cellulaire ou dendritique, la sous structure qui se produit au refroidissement est déterminée par G et R qui contrôlent la quantité de surfusion constitutionnelle. La zone de surfusion constitutionnelle est la région du liquide où la

température réelle est inférieure à la température d'équilibre à cause des variations de compositions et des gradients thermiques.

Si une soudure est réalisée à vitesse constante, la vitesse d'avance du front de solidification R est fixe (Fig.3).

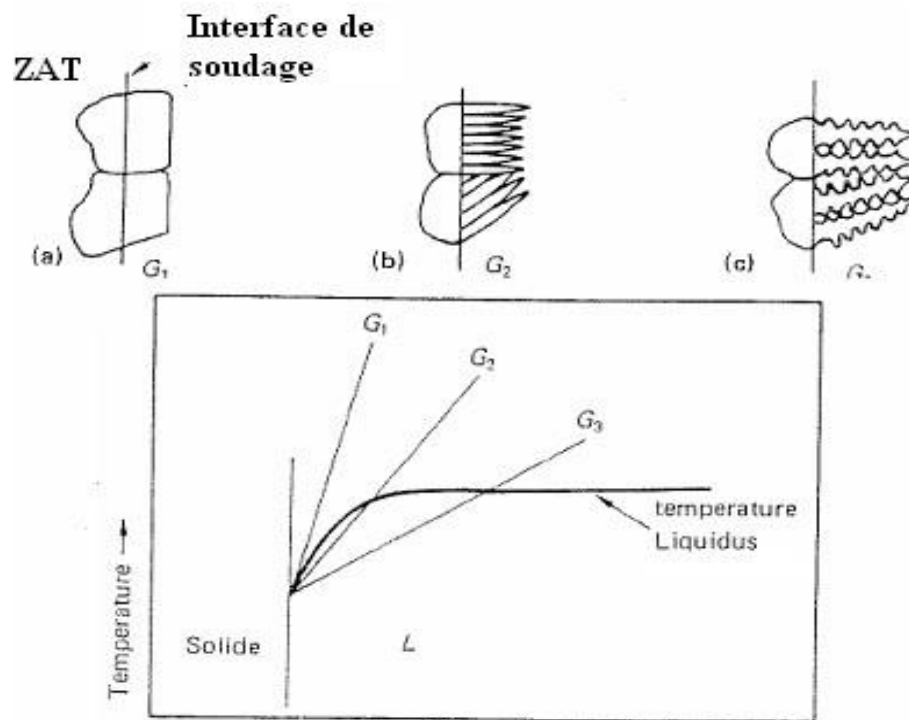


Figure III.3 : Effet du gradient de température sur le mode de solidification des soudures pour une vitesse constante.

En induisant un gradient de température extrêmement élevé (pente importante) il n'y a pas de surfusion constitutionnelle et la structure de solidification est plane. Quand le gradient décroît légèrement, les protubérances de métal solide à l'interface croissent plus vite que l'interface plate restante car le solide croît dans une zone de liquide en surfusion.

De ce fait les protubérances solides sont présentes à une température en dessous du liquidus de l'alliage. Il en résulte une sous structure cellulaire dans chaque grain à croissance épitaxiale.

Si la valeur du gradient de température décroît encore, la zone de surfusion est si importante que des bras secondaires se forment et une croissance dendritique cellulaire ou dendritique colonnaire est observée.

Dans une sous structure dendritique cellulaire chaque grain contient plusieurs dendrites cellulaires alors que dans une structure dendritique colonnaire, un grain est occupé par une seule dendrite.

Le plus haut degré de ségrégation se produit lors d'une solidification dendritique alors qu'aucune ségrégation mesurable ne se produit lors d'une croissance plane. Un haut pourcentage d'éléments d'alliages associé à des coefficients de partage à l'équilibre différents de l'unité favorisera donc une sous structure dendritique

III.4.2.b Effet de la vitesse de refroidissement:

L'effet cumulé de G et de R gouverne le mode de croissance et donc la forme de la sous structure de solidification. Le produit $G \times R$ est équivalent à une vitesse de refroidissement exprimé en $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ et par conséquent plus $G \times R$ sera important et plus les structures cellulaires, dendritiques colonnaires ou même dendritiques équiaxes seront fines, l'espacement entre les bras des dendrites est aussi influencé par la vitesse de refroidissement, une faible vitesse favorisant un espacement plus grand et donc un effet de grossissement de la sous structure.

L'effet du gradient de température G et de la vitesse de solidification R sur la morphologie de la sous structure sont résumés dans le schéma suivant (Fig.4).

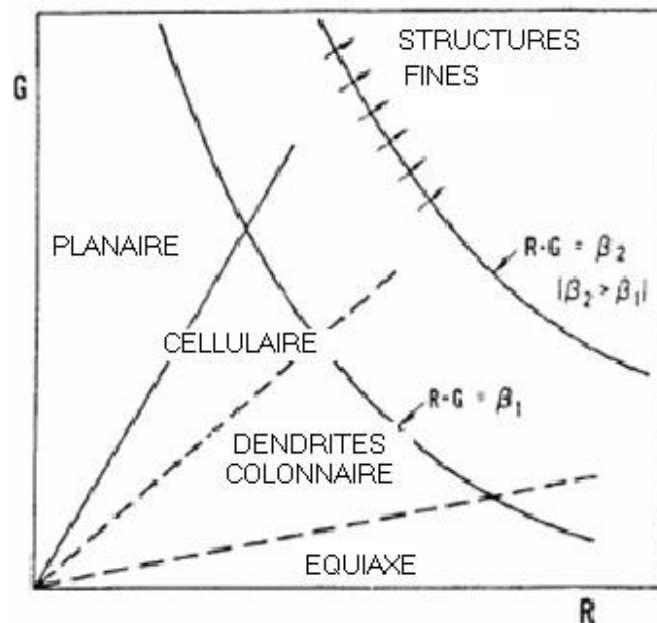


Figure III.4 : Schéma du gradient de température en fonction de la vitesse de croissance montrant les modes de solidification possibles.

En pratique les sous structures cellulaires et dendritiques cellulaires sont les plus observées fréquemment dans les structures de soudage. De plus il est très difficile de contrôler G et R indépendamment lors du processus de soudage car en règle générale une vitesse de soudage importante, et donc une vitesse d'avance de l'interface R grande, produira un gradient thermique élevé. De ce fait la sous-structure de solidification d'un alliage donné dépendra des concentrations en soluté, du degré de partage à l'équilibre des éléments d'alliage et des paramètres de soudage.

Les diagrammes de transformation au refroidissement continu après soudage (diagrammes TRCS) indiquent le type de structure trouvé dans la zone affectée thermiquement, la dureté moyenne sous cordon et la durée de refroidissement (Fig.5)

Une zone non affectée thermiquement, le métal de base est resté, bien que sa température se soit élevée, en dessous du point de transformation Ac_1 et il y a peu ou pas de modifications des caractéristiques du métal de base.

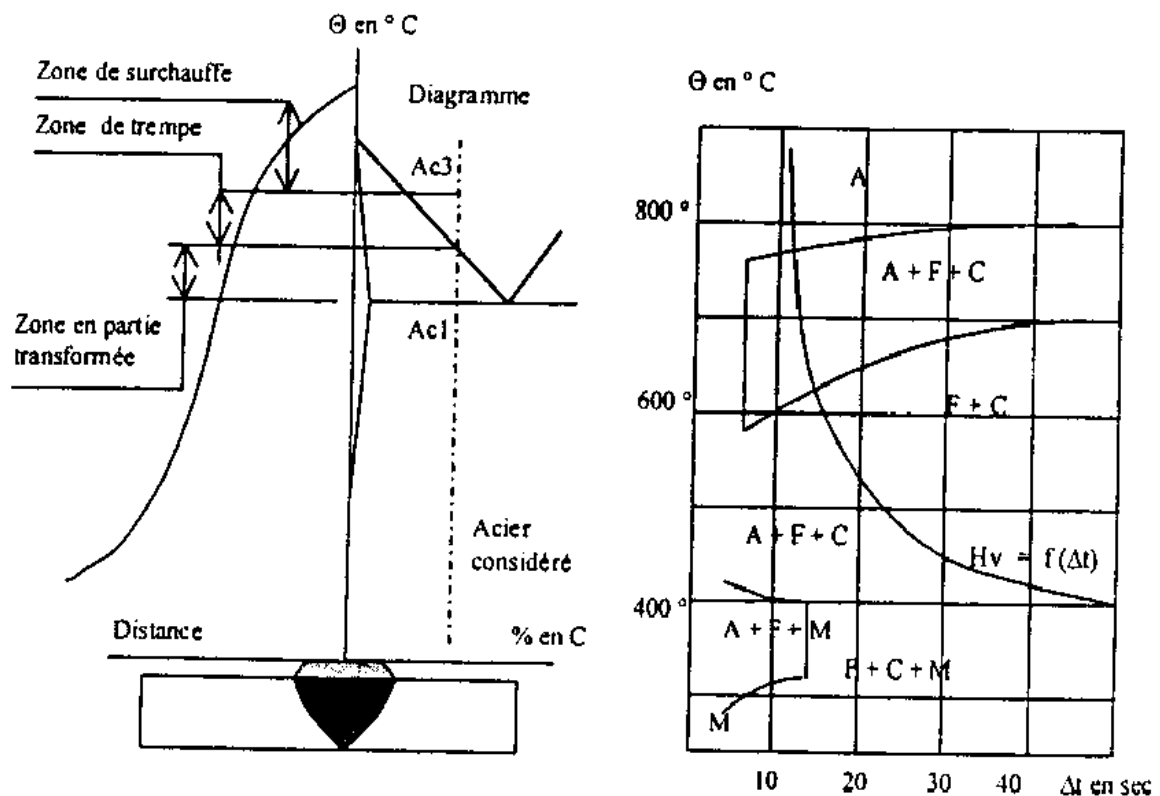


Figure III.5 : Différentes zones d'une soudure et diagramme TRCS (Δt 500-800 $^{\circ}C$) d'un

acier XC48.

III.4.3.b La soudabilité:

En dehors de contraintes relatives au mode opératoire (capacité à assurer la continuité physique du joint) ou à la conception de l'ensemble soudé (répartition des masses, déformations), on appelle soudabilité l'aptitude d'un métal ou d'un alliage à être assemblé par un procédé de soudage qui assure la continuité métallique du matériau.

Comme évoqué précédemment, d'une part sur le plan métallurgique il y a dilution du métal d'apport dans le métal de base mais aussi des effets de l'enrobage des électrodes ou du flux de protection, d'autre part sur le plan thermique l'énergie spécifique de la source et les propriétés thermiques du métal de base définissent l'importance des zones affectées thermiquement, en conséquence la soudabilité dépendra des choix effectués.

III.4.4.b La soudabilité des aciers:

Elle est étroitement dépendante de la composition chimique de l'acier de base et de la façon dont les éléments présents interviennent (modification des domaines α et γ , formation de précipités...):

- des éléments favorisent la présence de la ferrite: chrome, silicium, aluminium, vanadium, molybdène, titane, tantale, niobium, bore. Un acier à faible teneur en carbone sera ferritique à toute température dès que la teneur de chrome atteint 13%.
- des éléments gammagènes c'est-à-dire augmentant le domaine γ : le plus important est le nickel et une concentration de 25 % peut abaisser la courbe de transformation $\gamma \Rightarrow \alpha$ en dessous de l'ambiante. D'autres éléments tels que le manganèse, le cuivre, le cobalt sont gammagènes.
- des éléments sont graphitisants, c'est-à-dire qu'ils favorisent l'apparition de carbone à l'état pur (c'est le cas du silicium, du tungstène).
- des éléments carburigènes qui forment avec le carbone des carbures et influenceront sur la trempabilité comme le tungstène, le vanadium, le molybdène, le titane, le niobium, le tantale.

La présence de ces éléments va donc modifier le comportement et les caractéristiques, par exemple le nickel réduit le coefficient de dilatation et affine le grain de l'acier, le chrome

diminue la conductibilité thermique et améliore la résistance à la corrosion, le manganèse fixe

le soufre dans un sulfure de manganèse à haut point de fusion ce qui évite une fragilité des joints de grain, le tungstène et le vanadium améliorent la tenue au revenu...

Plusieurs formules empiriques ont été proposées pour définir la soudabilité des aciers et apprécier l'effet sur la trempabilité, elles permettent de calculer le carbone équivalent par l'équation :

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Mo}{5} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%V}{10} \dots\dots\dots (1.1)$$

Comme exemple, un acier ayant un taux de carbone équivalent inférieur à 0,5 est généralement considéré comme soudable, pour un taux inférieur à 0,4 la sensibilité aux fissures est faible.

Les aciers faiblement alliés sont aisément soudables, pour les aciers fortement alliés dans la zone de dilution, qui présente une composition différente de celles du métal de base ou du métal d'apport, il peut se produire des trempes excessives, une fragilisation ou des fissures.

Le choix du métal d'apport est primordial et dans certains cas il conviendra d'effectuer un préchauffage et (ou) un traitement thermique de revenu.

La fonte blanche, difficilement usinable, est pratiquement non soudable du fait de la grande quantité de cémentite. Les fontes grises n'offrent pas une bonne soudabilité du fait des lamelles de graphite qui constituent des amorces de rupture. Il faudra préchauffer les pièces à 600°C à cause de leur faible ductilité et refroidir lentement pour éviter les contraintes.

Chapitre IV : Partie Expérimentale

IV. Introduction :

Quel que soit le procédé de fabrication, pour obtenir des produits de qualité bien définie et constante, il importe non seulement de vérifier que les pièces terminées sont conformes, mais encore de s'assurer, qu'au cours des divers stades de fabrication, les facteurs qui agissent sur la qualité finale sont maintenus dans les normes prévues.

N'opérer qu'un contrôle final conduit, en effet, à constater qu'on a produit des pièces non conformes, lorsqu'il est trop tard pour l'éviter.

cette partie sera remplacé par une comparaison entre deux études réalisées dans le cadre de préparation du diplôme de Master par les ex étudiants Hasnaoui et Azzouz .

IV.1 Deux contrôle ont été utilisés :

. Contrôle par Ressuage :

Le ressuage est un procédé de contrôle non destructif. Au niveau du soudage, il permet d'observer des défauts débouchant tels que des piqures, fissures, retassures...

Un liquide pénétrant et coloré ou fluorescent est infiltré dans les défauts, puis ensuite mis en valeur par un produit révélateur.

•Le contrôle par ultrasons •

L'ultrason est une onde mécanique et élastique, qui se propage au travers de supports fluides, solides, gazeux ou liquides. La gamme de fréquences des ultrasons se situe entre 20 000 et 10 000 000 Hertz, trop élevées pour être perçues par l'oreille humaine.

Le contrôle par ultrason est appliqué aux fabrications, aux demi-produits et éventuellement aux produits finis, en petite ou grande série, il est capable de mettre en évidence les défauts en préservant l'intégrité des produits contrôlés.

IV.2 Résultats HASNAOUI :

IV.2.1 Contrôle par Ressuage :

Nettoyage des pièces :

- Nettoyer, dégraisser et sécher les pièces à traiter.



FigureIV.1 : la pièce nettoyage.

- L'utilisation de produits nettoyant est une opération préliminaire à l'opération de ressuage,
- L'objectif est d'obtenir une surface propre pour permettre au pénétrant de s'infiltrer dans les défauts.
- L'opération de nettoyage consiste à enlever toute crasse, graisse, trace de repérage, huile ou autre substance pouvant masquer les indications du test à l'aide d'un chiffon blanc propre, sec, non pelucheux imbibé d'un solvant fourni par un fabricant agréé.

Application du pénétrant :

Appliquer un produit pénétrant. Le produit pénétrant peut être coloré ou fluorescent. Ce produit a pour particularité de pouvoir s'insérer par capillarité dans les interstices les plus fins. Beaucoup de produits pénétrants sont de couleur rouge. Au niveau de la sécurité, il est important de rappeler que ce produit est inflammable et parfois nocif (prendre des dispositions de sécurité pour effectuer un contrôle avec cette méthode : masque, s'éloigner des poste à souder, ...). Les produits fluorescents sont utilisés sous

rayons ultra-violet pour la détection. Certains pénétrants sont à post-émulsion et auront une opération supplémentaire D'émulsification avant le rinçage.

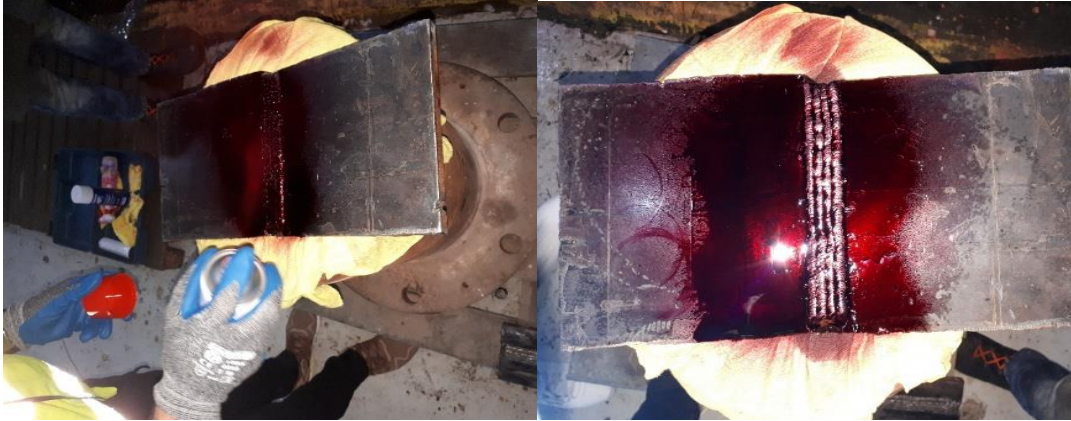


Figure IV.2 : Application le produit ressuage Rouge

Application du pénétrant rouge suivant la sensibilité de l'examen, pour un temps d'imprégnation de 20 minutes.

Élimination de l'agent pénétrant en excès :

Après avoir appliqué l'agent pénétrant et le temps spécifié, il faudra enlever l'excédent du pénétrant restant sur la surface à l'aide des chiffons blancs, secs et propres non pelucheux ou par un papier absorbant, ou par un pistolet air- eau à condition que la pression d'eau ne doive pas dépasser 2 bars.



FigureIV.3 : Élimination produit ressuage Rougé

Application de l'agent développant(Révélateur) :

L'application du révélateur ne doit être effectuée que sur une surface sèche (non mouillée).

Appliquer le révélateur immédiatement, pulvériser le révélateur sur la surface concernée, à une distance de 25 cm de la surface et pour avoir une couche uniforme.

Une quantité trop faible peut être insuffisante pour extraire l'agent pénétrant.

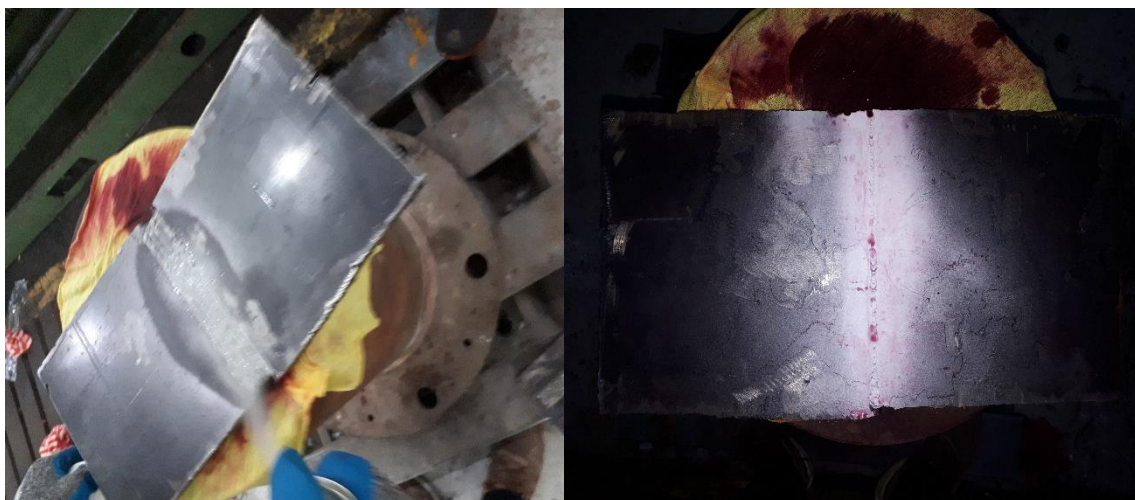


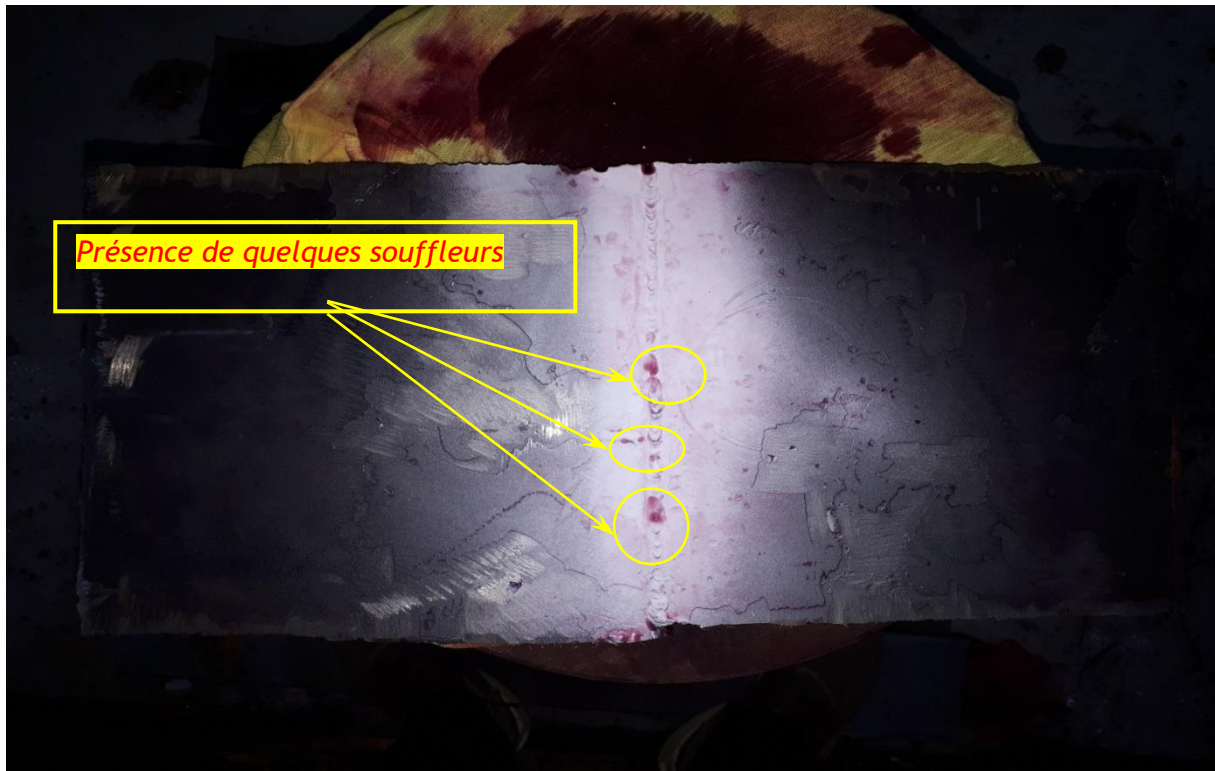
Figure IV.4 :application du révélateur

Application du révélateur en fine couche uniforme. L'interprétation des indications se fait immédiatement et durant les 30 minutes suivantes.

L'Interprétation des Défauts :

Quel que soit le type de ressuage (coloré) les indications qui peuvent être décelées sont soit :

- de forme arrondie
- de forme linéaire



FigureIV.5 : défauts dans la pièce après ressuage

OBSERVATION :

- *Apparition de quelques souffleurs éparpillés sans incidences sur le joint de soudure.*

L'importance du défaut est caractérisée par la grosseur de l'indication

Interprétation des résultats :

La surface concerné par l'interprétation doit être soigneusement observé lors de L'application du révélateur et les résultats doivent être interprétés de 10 - 60 minutes après l'application du révélateur ou selon les recommandations du fabricant.

Si on n'a pas des résultats au temps écoulé on peut augmenter le temps d'interprétation à condition que la surface à examiner reste humide. Si de fausses indications sont soupçonnées, réexaminer cette partie.

Evaluation :

Toutes les indications pertinentes de surface doivent être relevées et évaluées

Conformément selon les codes, norme et les spécifications d'acceptation ou spécifications applicables émises par le maître de l'ouvrage.

Un PV de contrôle par ressuage doivent être soigneusement préparé pour contenir toutes les informations relevés sur la surface examinée :

- Nature de la surface examinée
- Numéro d'identification de la pièce
- Matériels utilisés
- Type des produits utilisés : pénétrant, colorant, révélateur, solvant, émulsifiant
- Durée de chaque opération
- Références et codes
- Date d'examen
- Nom de l'inspecteur niveau II

Résultat d'examen (identification des défauts, qualification, quantification, décision d'acceptation ou de refus).

IV.2.2 Le contrôle par ultrasons :

- **Appareil à ultrasons :** Sonatest D-10+.

Producteur : sofranel « Allemagne ».

- **Traducteurs :** -palpeur droit « OL », Ø10, 4MHz.
-palpeur à angle « OT », « 45°, 60°, 70° », 4MHz, 8×9
- **Blocs d'étalonnages :** V1 type B.
- **Blocs de référence :** ce sont des blocs réalisés dans un matériau présentant des caractéristiques acoustiques voisines, qui présentent des réflecteurs artificiels tels que :
 - des trous cylindriques à fond plat,
 - des génératrices de trous cylindriques,
 - des rainures ou entailles.



Figure. IV.6 matériel utilisé.

Vérification des caractéristiques des palpeurs :

➤ **Palpeur droit :**

A. Détermination de la zone de silence ou la zone morte :

La plus petite distance au-dessus de laquelle un réflecteur donné ne fournit plus un écho net est bien séparé, de l'impulsion initiale détermine (zone morte).

Pour déterminer la zone morte de notre palpeur droit nous avons utilisé une cale à gradins.

« t » correspond à la durée de l'émission. Pendant ce temps, tout écho correspondant à un défaut ne sera pas visualisé, donc non détecté, puisque son écho sera superposé à celui de l'émission.

« ZM » la zone morte (ou zone de silence) peut être assimilée à une distance.

La détermination de cette zone est donc nécessaire avant tout contrôle avec un « palpeur droit », afin de connaître avec précision l'étendue du contrôle.

Il suffit de mettre le palpeur sur une position « P » de la cale à gradins correspondante à une épaisseur « e », puis voir si l'écho de ce réflecteur est séparé du signal d'émission, on déplace le palpeur sur une position « P' » correspondante à une épaisseur « e' » inférieure à « e » et ainsi de suite jusqu'à une

position correspondante à une épaisseur minimum où l'écho du réflecteur arrive presque à toucher le signal d'émission. Et on dit que la zone de silence est égale à cette épaisseur minimum.

NB : Si un contrôle à 100% de la pièce est exigé, c'est un examen près de la surface doit être effectué alors un « relais » peut être adapté au palpeur ou la technique par immersion doit être adoptée.

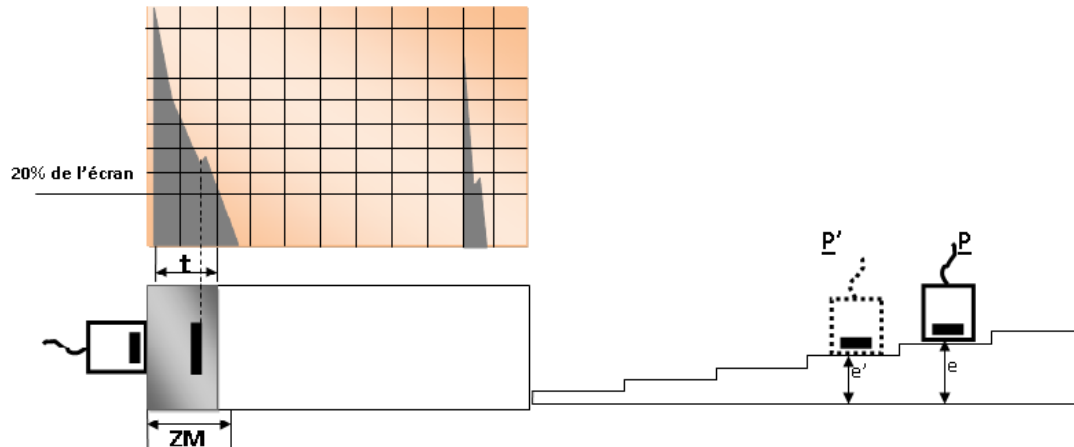


Figure. IV.7 détermination de la zone morte.

Pour notre palpeur la zone de silence égal à 4mm.



Palpeur à angle :

- **Détermination du point d'émergence (ou d'incidence) :**

Lorsque l'écho atteint son maximum d'amplitudes, le « point d'émergence » du faisceau ultrasonore coïncide avec le centre de l'arrondi de (rayon=100mm) exactement.

On peut lire la graduation qui correspond sur face latérale du palpeur.

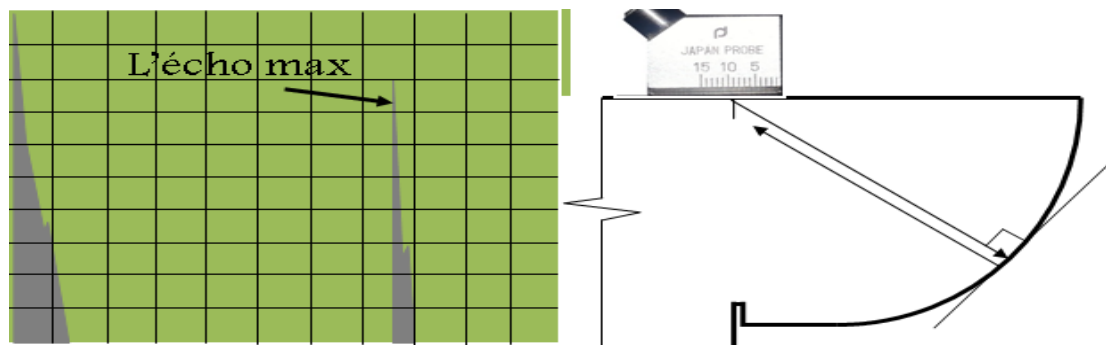


Figure. IV.8 détermination du point d'émergence.

Dans notre cas nous avons trouvé les points d'émergences suivantes :

Palpeur (OT 45°) : PE=14mm.

Palpeur (OT 60°) : PE=9mm.

Palpeur (OT 70°) : PE=13mm.

Avec : « PE » : le point d'émergence



Exemple : Déterminer points d'émergence de Palpeur (OT 70°)

vitesse de balayage :

En contrôle manuel, la vitesse de déplacement du traducteur est généralement inférieure à 150mm/s.

Mouvement du palpeur :

- ✓ **Mouvement Zig zag :** est une combinaison entre deux mouvements longitudinal et transversal, parallèle à l'axe de la soudure avec un pas ne dépasse pas la largeur du palpeur.
- ✓ **Mouvement pivotant :** des oscillations angulaires de « 10° à 15° » environ d'amplitude de chaque côté de l'axe de déplacement.

Choix du Palpeur :

$D \leq 20\text{mm}$: angle 70°

$20 \leq D \leq 35$: angle 70°+60°

$D > 35$: angle 45°+60°

L'épaisseur de la pièce < 20mm donc le Palpeur utilisée est : Palpeur 70°



Figure IV.9 : Choix le Palpeur (OT 70°)

Exécution du contrôle

Après avoir réussi à étalonner nous allons procéder au contrôle d'une pièce soudée, mais avant le commencement et afin de faciliter le travail il y a des paramètres à déterminer tels que le recule max et l'échelle minimale.

A. Le recule max :

C'est le point le plus loin du bord de joint qu'il va nous assurer de contrôler la soudure et la zone affectée thermiquement par un demi bond et un bond complet.

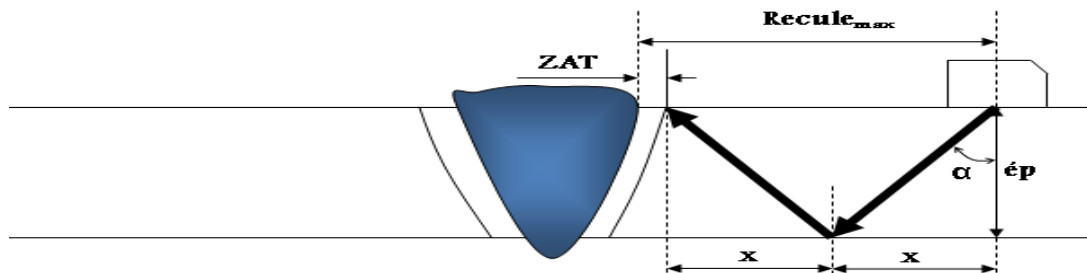


Figure IV.10 calcul de recul max.

$$R_{max} = x + x + ZAT = 2x + ZAT$$

$$x = ép \cdot tg(\alpha) \rightarrow x = 20 \cdot tg(70) = 54.94\text{mm}$$

Donc

$$R_{max} = 2 \cdot ép \cdot tg(\alpha) + ZAT$$

Tel que : ép : c'est l'épaisseur de la pièce

ZAT : généralement on la prend 10mm

Dans notre cas ép = 20 mm, α = 70° , ZAT= 10 mm.

Donc :

$$R_{max} = 2 \cdot 20 \cdot \tan(70) + 10 = 119.88 \text{ mm}$$

A. L'échelle minimale (l'étendu) :

C'est le parcours sonore minimal à afficher sur l'écran de visualisation et il est défini par la relation suivante :

Etendu = 1.25 X (un bond complet)

Un bon complet = 2. $y = \frac{\text{ép}}{\cos \alpha}$ Dans notre cas :

$$y = \frac{20}{\cos 70} = 58.47 \text{ mm}$$

Etendu = 1,25 X 2 X 58.47 = 146.175 mm

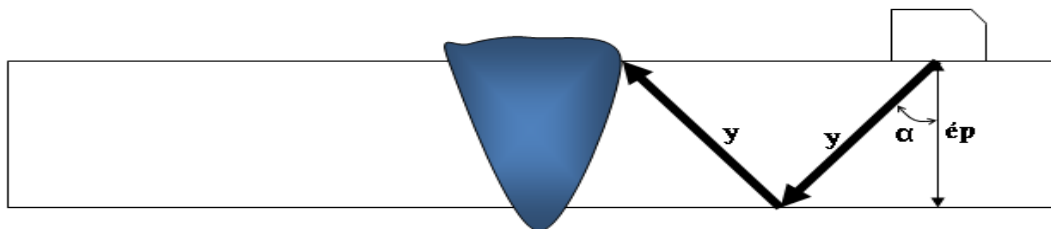
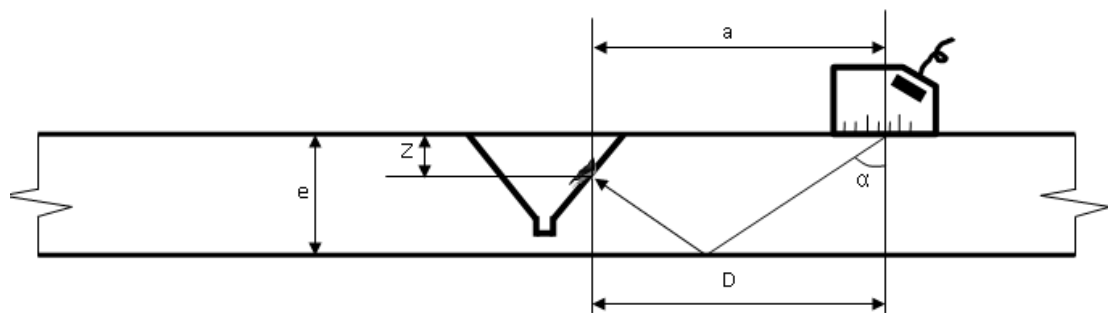


Figure. IV.11 calcul de l'étendu.

Localisation du défaut :



Lorsqu'u

n écho est apparu sur l'écran de l'appareil à ultrason :

- L'amplitude maximale est d'abord recherchée.
- Le parcours sonore est déterminé (lu directement sur l'écran de l'appareil)
- La cote « a » est mesurée du point d'émergence du transducteur à l'axe de la soudure.
- La cote « x » du point « 0 », début de palpage à l'axe géométrique du transducteur.

Ensuite la localisation, c'est à dire l'endroit exacte de l'indication dans le joint de soudure (cote « y » et « z ») est déterminée par **calcul**.

Connaissant l'angle de réfraction « aréel » ainsi que l'épaisseur de la pièce « e » :

1^{er} cas : détection en ½ bond

$$D = PS \times \sin \alpha, Z = PS \times \cos \alpha$$

2em cas : détection en bond complet

$$D=PS \times \sin \alpha, Z=2 \times e - (PS \times \cos \alpha).$$

Dimensionnement de défaut :

Détermination du palpeur pour 1/2 bond et le bond complet

Note : la détection du défaut était par 1/2 bond.

Nous présentons ci-dessous les échos des défauts en contrôle par la méthode d'écho d'anomalie : voir (figure IV.10) et (figure IV.13)

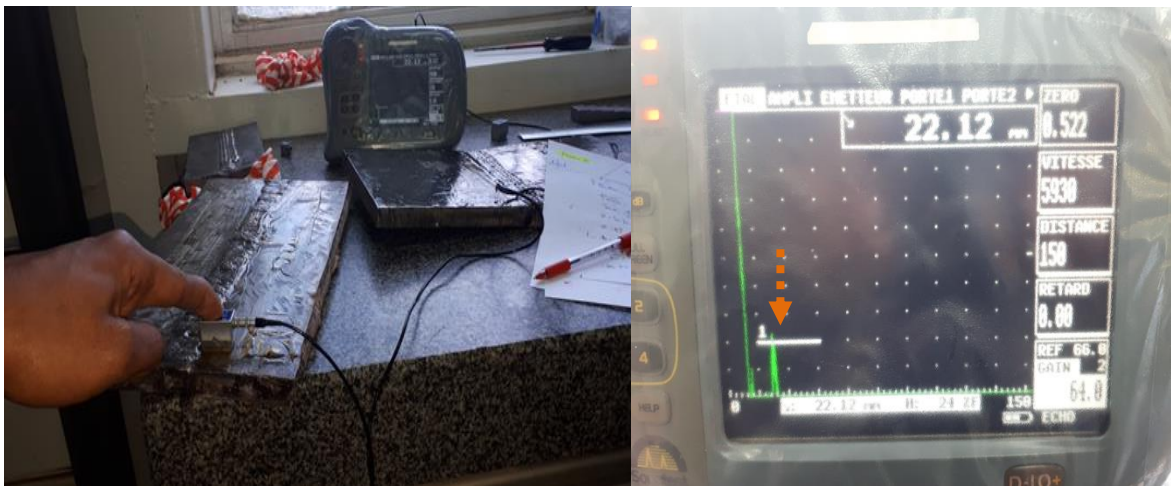
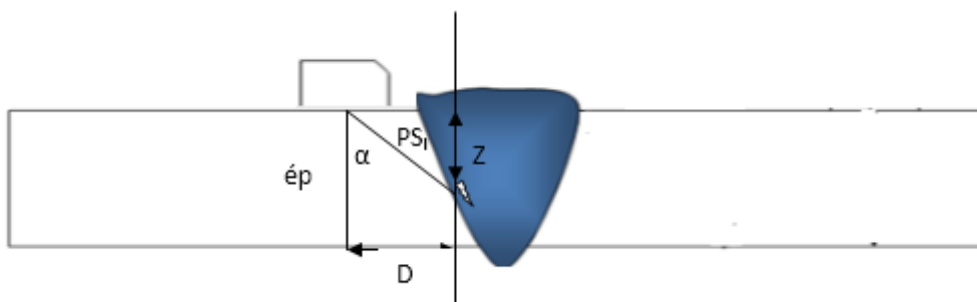


Figure IV.12 : Contrôle la pièce par ultrasons **Figure IV.13** : tracé de l'écho de défaut I



1er cas : détection en 1/2 bond

1/ ép=20mm ; $PS_I=22.12$

D

$$D = PS \times \sin \alpha = 22.12 \times \sin 70 = 20.78 \text{ mm}$$

$$Z = PS \times \cos \alpha = Z = 22.12 \times \cos 70 = 7.56 \text{ mm}$$

$$2/ \text{ ép} = 20 \text{ mm} ; \quad PS_{II} = 26.26$$

$$D = PS \times \sin \alpha = 26.26 \times \sin 70 = 24.67 \text{ mm}$$

$$Z = PS \times \cos \alpha = Z = 26.26 \times \cos 70 = 8.98 \text{ mm}$$

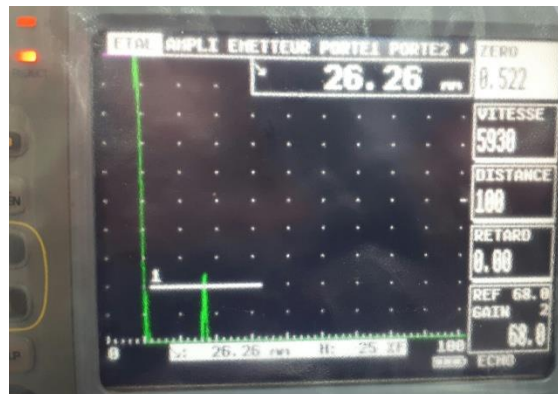
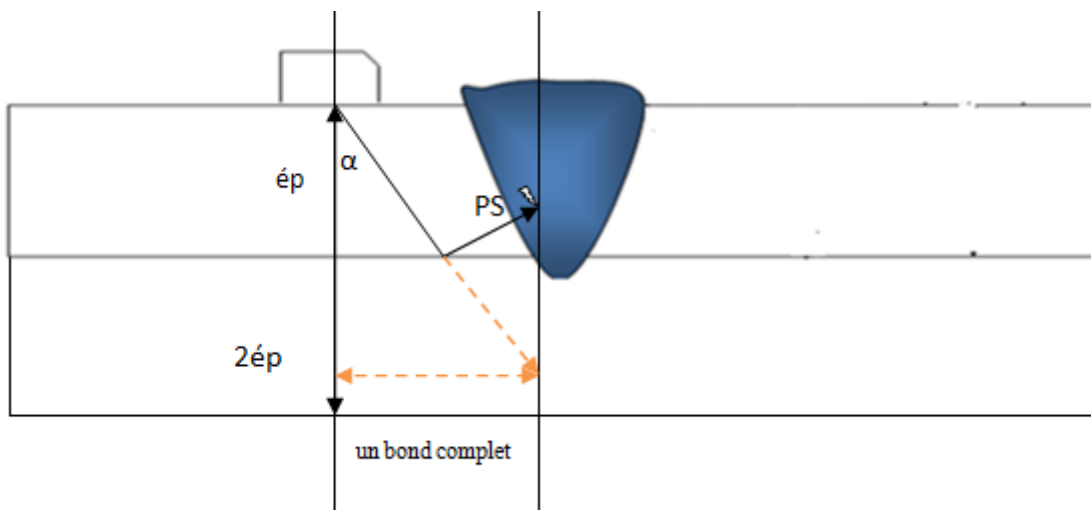


Figure IV.13 : tracé de l'écho de défaut I

Détermination des palpeurs pour bond complet :



$$\text{épé} = 20 \text{ mm} ; \quad PS_{III} = 87.59$$

$$D = PS_{III} \times \sin \alpha = 87.59 \times \sin 70 = 82.30 \text{ mm}$$

$$Z = 2 \times \text{ép} - (PS_{III} \times \cos \alpha) = 2 \times 20 - (87.59 \times \cos 70) = 10.05 \text{ mm}$$

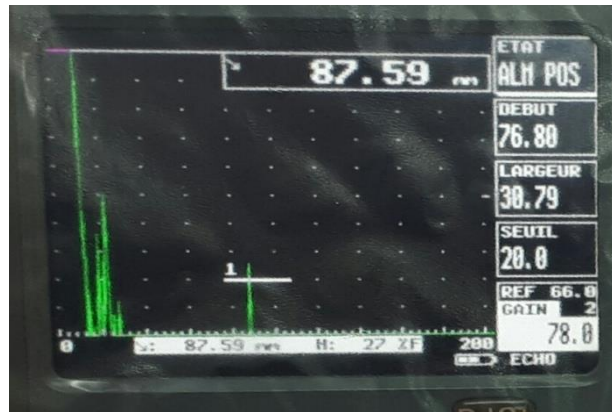


Figure IV.13 : tracé de l'écho de défaut I

Interprétation :

D'après les résultats obtenue le défaut est volumique de type « manque de fusion sa

- 1- longueur est de D_I ...mm.et profondeur Z_I ...mm
- 2- D_{II} = mm Z_{II} = mm
- 3- D_{III} = mm Z_{III} = mm

IV.3 Résultats AZZOUZ :

IV.3.1 Contrôle par Ressuage :

-Nettoyage : Eliminer la rouille, la calamine, le score. ...etc., à la brosse métallique ou à la meule et le dégraissage par solvants chlorés, Il est essentiel que la surface à examiner soit complètement séchée avant l'application du produit pénétrant.

-Déposition du pénétrant : Le produit de ressuage peut être appliqué sur la pièce au pinceau ou au pistolet. Le temps de pénétration sera généralement compris entre 10 et 20 minutes, pendant ce temps, on s'assurera que la surface reste mouillée.

- Élimination de l'excès de pénétrant:

Après le temps de pénétration, on élimine l'excès de produit, correspondant à un rinçage avec agitation d'eau à une température $\leq 50^\circ\text{C}$ et à une pression $< 3.5\text{bar}$, puis on procédera sans tarder au séchage et développement.

-Application du révélateur :

Un révélateur suspendu dans un liquide est utilisé. L'application au pistolet immédiatement après mélange ou agitation, pour assurer une suspension égale, est recommandée.

V -5. 33. Examen Contrôle par ressuage :

Il prendra la pièce soudure après contrôle visuel pour jouer le rôle de ressuage, Les ressues effectués dans l'ordre comme suit:

-Nettoyage : produits nettoyage : voir (figure V.14) et (figure V.15).



Fig. (IV.14) : produits nettoyage.



Fig. (IV.15) : la pièce nettoyage.

- Déposition du pénétrant : Le produit de ressuage peut être appliqué sur la pièce au pinceau ou au pistolet coular rouge, Le temps de pénétration sera généralement compris entre

10. voir (figure IV.16)et voir (figure IV.17)



Fig. (IV.16) : produits ressuage Rougé. **Fig. (IV.17) :** la pièce

- Élimination de l'excès de pénétrant :
- Application du révélateur : voir (figure IV.3.5)



Fig.(IV.18) : produits ressuage

V -5. 3.4. Observations : voir (figure IV.19) et (figure IV.18)



Fig.(IV.19) : défauts -1- don pièce **Fig.(IV.20) :** défauts-2- don pièce

Discussion et interprétation :

Observations Sur la pièce défauts de surface :

- défauts Manque de pénétration
- défauts Fissuration sous cordonet Fissure de solidification.

IV.3.2 Le contrôle par ultrasons :

Objetset domained'application:

L'objetdel'examenpar ultrasonsestdedétecterd'éventuelsdéfautsinternes dans les pièces, etautantque possible,d'enestimerl'importance(nature, dimensionsetposition)

Principe demise en œuvre de Ultrasons : voir (figure IV.21).

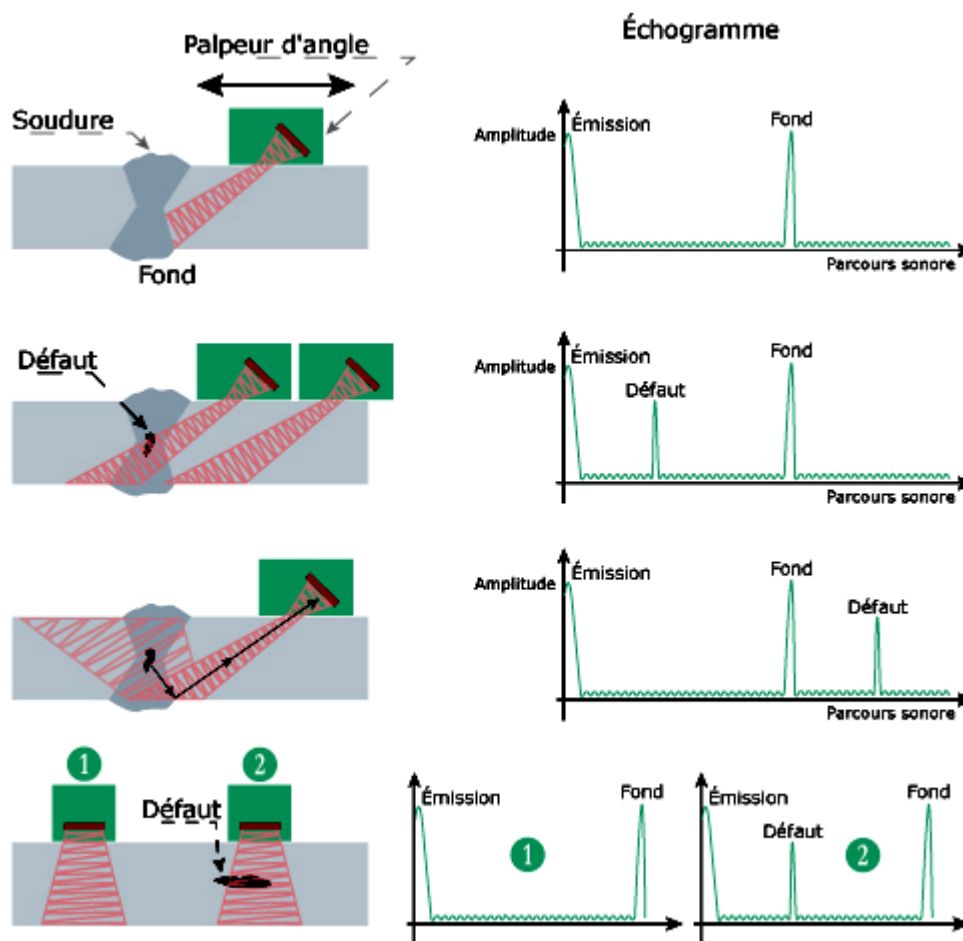


Fig.(IV.21) :Schémadeprincipe demise en œuvre de Ultrasons.

Examen Contrôlepar ultrasons« UT» :

Matériel pour le contrôle non destructif :

Générateur :

- a. Générateur d'ondes ultrason : USL32(figure IV.3.9), muni d'une table traçante.

Marque : Krautkramer, Origine : République fédérale d'Allemagne

b. Palpeur émetteur-récepteur : MSEB4 pour ondes longitudinales (figure IV.3.10), atteindre de 8 à 20mm d'épaisseur et possédant les caractéristiques suivantes :

- Diamètre du palpeur : $\varnothing = 10 \text{ mm}$
- Epaisseur de la pastille de quartz : $\varnothing = 3.5 \text{ mm}$
- Fréquence : $f = 4 \text{ MHz}$
- Calibre V1. (Figure IV.3.11)

Palpeurs :

Palpeur émetteur-récepteur: MW770-N2 pour ondes transversales, possédant les caractéristiques suivantes: - Diamètre du palpeur: $\varnothing = 10 \text{ mm}$

- épaisseur de la pastille quartz: $\varnothing = 3.5 \text{ mm}$
- fréquence: $f = 2 \text{ MHz}$
- point d'émergence $E = 14 \text{ mm}$
- angle d'incidence = 60°



Fig.(IV.22) :Palpeur émetteur-récepteur: MSEB4



Fig.(IV.23) :calibre d'étalonnage V1 Fig.(IV.24) :Générateur d'ondes ultrason: USL32

Contrôle la pièce par ultrasons :

Branch la générateur et Palpeur émetteur-récepteur: MSEB4 et calibre d'étalonnage puis Contrôle la pièce. voir (figure IV.25).



Fig. (IV.25) :Contrôle la pièce par ultrasons .

Résultats des essais aux ultrasons :

Dimensionnement des défauts :

Contrôle par la méthode d'écho d'anomalie :

Nous présentons ci-dessous les échos des défauts en contrôle par la méthode d'écho d'anomalie : voir (figure IV.26),et (figure IV.27)

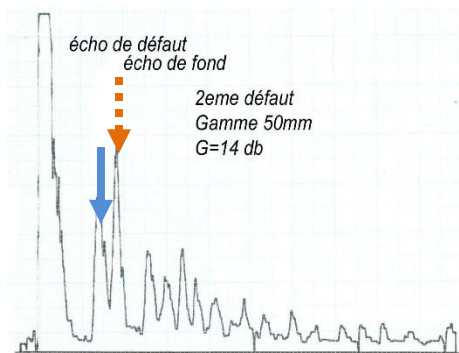


Fig.(IV.26) :Tracé de l'écho enregistré au niveau 2 défaut.



Fig.(IV.27) :tracé de l'écho enregistré au niveau1 défaut.

Traitements des résultats :

b .1) Incidence directe :

On relève sur chaque tracé des échos, le PUS du fond (noté : e, repéré en rouge) et celui du défaut (noté : d, repéré en bleu), on calcule ensuite la différence (e-d) pour estimer la hauteur du défaut à l'aide de l'équation suivante :

$$h = (e-d) / 2$$

b .1) Les résultats des tracés sont représentés suivante :

Défaut 1=L= 6mm* 12mm de la fissure

Défaut 2=D=13mm *.L=5mm..... Manque de pénétration

b .2) Incidence oblique:

On relève sur chaque tracé des échos, le PUS du défaut (noté : d), on calcule ensuite la position du palpeur (Pt) et le parcours ultrasonore (l) selon le mode de contrôle effectué a savoir ; 1 bond ou ½ bond, et on estime la hauteur du défaut à l'aide des équations suivantes :

Contrôle en 1 bond :

$$Pt = l . \sin \alpha$$

$$k = 2 . e - l . \cos \alpha$$

$$h = e - k ; \quad k : \text{matière restant seine}$$

Contrôle en 1/2 bond :

$$Pt = l . \sin \alpha$$

$$k = l . \cos \alpha$$

Les tracés de 1 à 2 sont obtenus par 1 bond.

Les résultats des tracés sont représentés suivant :

Défaut 1=L= 5mm* 10mm de la fissure

Défaut 2=D=10mm *.L=18 mm..... Manque de pénétration

IV.4 Comparaison des résultats :

Le contrôle par ultrason et contrôle ressuage qui sert actuellement à apprécier qualitativement les défauts, n'est pas encore considéré comme critère de validité des produits en mécanique, il faut avoir recours à d'autres méthodes comme les rayons X et δ pour avoir la certitude vis à vis du produit examiné.

Nous venons de démontrer qu'on peut compter dessus en expertise et en contrôle à condition d'apporter des améliorations futures.

-Le dimensionnement par la méthode oblique donne de bons résultats comparés à la méthode directe ce qui permet de la valider.

Contrôle par ressuage :

le contrôle par ressuage n'a révélé aucun défaut de surface . on admet alors que la qualité de la soudure est bonne.

Résultats des essais aux ultrasons :

Le contrôle par ultra son nous a aidé à détecté des défauts mineurs de fissuration et de manque de pénétration. L'ultra son contrôle les défauts interne des assemblage, en comparaison par les autre contrôle on peut juger que ces défauts peuvent êtres causés par une mauvaise préparation des chanfreins des pièces ou bien encore une fausse manœuvre du soudeurs. Parceque ce défaut à été remarqué dans une seule partie de la plaque soudée. Le contrôle par ultrason qui sert actuellement à apprécier qualitativement les défauts, n'est pas encore considéré comme critère de validité des produits en mécanique, il faut avoir recours à d'autres méthodes comme les rayons X et δ pour avoir la certitude vis à vis du produit examiné.

Nous venons de démontrer qu'on peut compter dessus en expertise et en contrôle à condition d'apporter des améliorations futures.

Conclusions Générale

La qualité d'une soudure dépend certainement du bon déroulement de l'opération de soudage, mais on n'aura aucune certitude sur l'état de la soudure si celle-ci n'est pas certifiée par un contrôle fiable et sûr.

Les défauts de soudage probables sont nombreux, mais aussi les procédés de contrôle sont multiples, et avec des techniques différentes. Mais le plus difficile est la détection des fissures dans une soudure.

En pratiquant l'analyse aux ultrasons, nous n'avons pas rencontré d'obstacles avec notre produit de soudage, relatifs à la structure métallographique c'est à dire de déviation du faisceau ultrasonore à cause des hétérogénéités du métal, donc la structure ferritique est parfaitement perméable aux ultrasons. Cependant on a enregistré pas mal de difficultés relatifs aux signaux perturbateurs dus aux plans de solidifications ou aux poches de gaz superposées au bouts des défauts que nous avons créés (perçages).

Les résultats obtenus des différents contrôles sont en faveur de la liaison métallique utilisée qui présente moins de défauts par rapport aux autres liaisons citées au début du 1er chapitre.

Parmi les difficultés entravant la mise en œuvre des contrôles ultrasonores sur les soudures, on peut citer la forme du joint qui n'est pas bien connue et la présence d'inclusions ou plans de solidifications plans ou volumiques au niveau des interfaces entre le métal fondu et le métal de base qui faussent les interprétations on peut attribuer d'autres difficultés liées au comportement du matériel (les sondes) vis-à-vis de la matière qui dépend de beaucoup de paramètres (rugosité, structure métallique) et d'autres sont relatifs à l'utilisateur (choix des palpeurs, calibrages, interprétations des signaux recueillis). Notre produit de soudage SG2 à faible teneur en carbone, déposé par soudage MAG au Ateliers MEI de SONELGAZ par des soudeurs certifiés selon la norme ISO 2003, avec le respect des normes de soudage en vigueur.

Perspectives :

Les techniques de détection des fissures sont nombreuses mais certaines d'entre elles sont coûteuses donc difficiles à réaliser en Algérie faute de moyens. Les techniques ultrasonores sont du moins faisables par rapport aux autres techniques citées dans ce manuscrit et peuvent devenir rentables si le problème de l'interprétation est résolu. Nous proposons de poursuivre cette étude par d'autres consacrées aux techniques d'interprétations par d'autres techniques tel que les contrôles par rayons X,

Références bibliographiques

- [1] Mémoire master de (Etude du procédé de soudage semi-automatique MIG- MAG d'un joint soudé en acier ST37) de Akachat Amel, Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi.
- [2] www.google.com/search?
Un+acier+est+un+alliage+métallique+constituéprincipalement
+ de+ fer.
- [3] Mémoire de master (Caractérisations mécaniques et structurales d'un acier de construction des pipelines (API 5L X60)) de Ahlam ACHOURI, Université deBiskra.
- [4] Mémoire de master (Étude les défauts de soudage des pipelines) de BENEDDEB Mostefa, Université Mohamed KhiderBiskra.
- [5] Mémoire hasnaoui et azzouz
- [6] JAMES A. PENDER «Le soudage» Edition Métrique1977.
- [7] JONATHON MONGENOU « Modélisation entre un arc électrique et un matériau : application au soudage TIG », thèse doctorat de l'université de Toulouse2013.
- [8] Mémoire d'ingénieur (Caractérisations mécaniques et électrochimiques d'un joint soudé en acier API 5L X70) de BENHAMMOUDA Abdelghani, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE, ENSMM-Annaba.
- [9] Roland CAZES « Soudage à l'arc », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique B7730.
- [10] R. Varisellaz « SOUDAGE Eléments de conception et de réalisation », Bordas, Paris, 1982.
- [11] www.sunnysteel.com ► Products.