

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté : Science de l'ingénierie
Département : Métallurgie et génie des matériaux
Domaine : Science et technologie
Filière : Métallurgie
Spécialité : Génie des surfaces métalliques

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

RECHARGEMENT PAR SOUDAGE

Présenté par : GHODBANE Rym

Encadrant : Mr. MERAKEB N

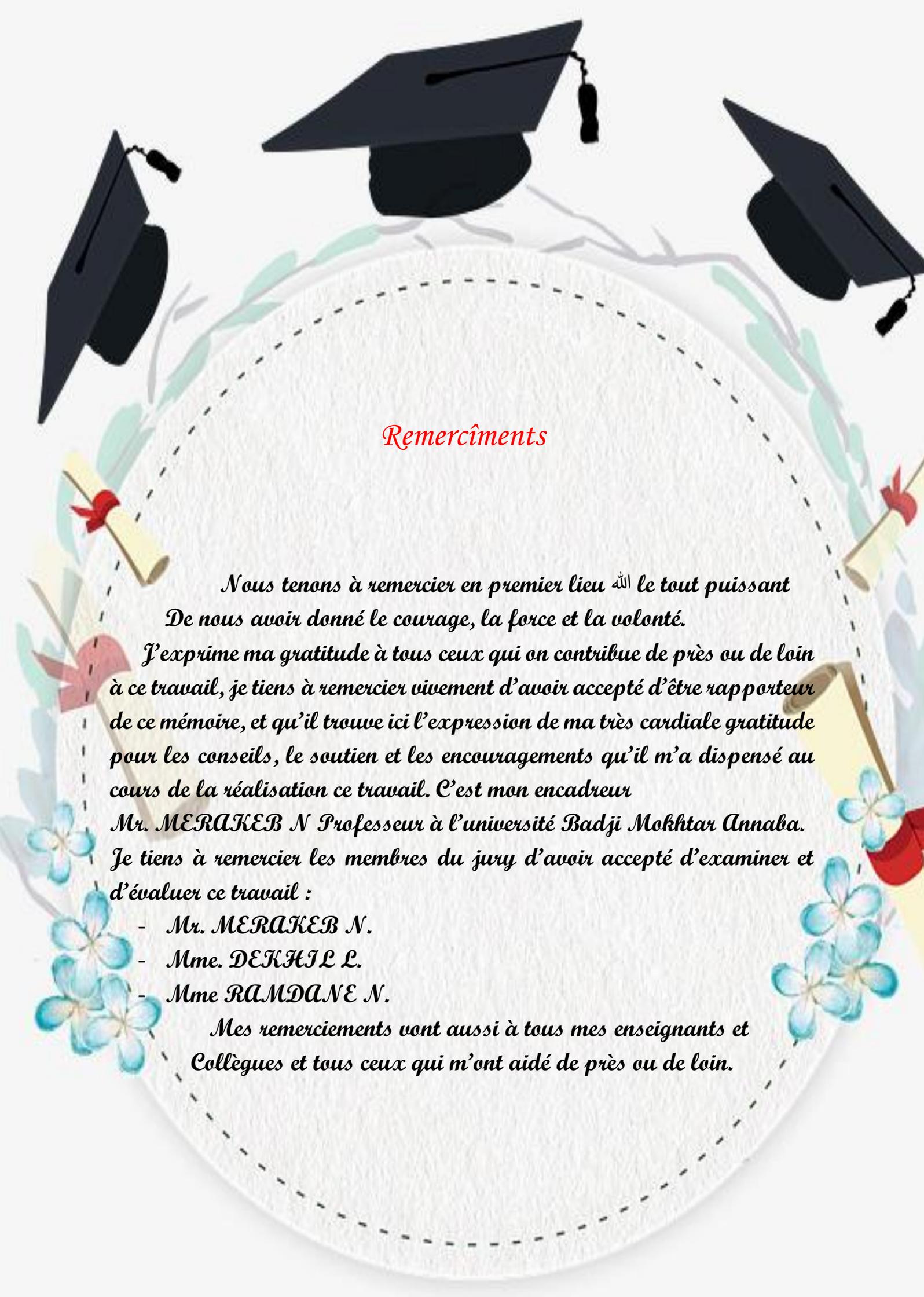
Professeur

UBMA

Jury de Soutenance :

Mr. MERAKEB N	Pr	UBMA	Président
Mr. MERAKEB N	Pr	UBMA	Encadrant
Mme. DEKHIL L	Dr	UBMA	Examineur
Mme. RAMDANE N	Dr	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020



Remerciements

*Nous tenons à remercier en premier lieu الله le tout puissant
De nous avoir donné le courage, la force et la volonté.*

*J'exprime ma gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
à ce travail, je tiens à remercier vivement d'avoir accepté d'être rapporteur
de ce mémoire, et qu'il trouve ici l'expression de ma très cordiale gratitude
pour les conseils, le soutien et les encouragements qu'il m'a dispensés au
cours de la réalisation de ce travail. C'est mon encadreur
Mr. MERAKEB N Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba.
Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et
d'évaluer ce travail :*

- Mr. MERAKEB N.*
- Mme. DEKHAL L.*
- Mme RAMDANE N.*

*Mes remerciements vont aussi à tous mes enseignants et
Collègues et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail tout d'abord à :

- *Mes très chers parents*
- *A Ma Chère mère LARÉF OUAHIDA :*

Ma très chère mère : j'aimerais toujours te remercier pour tous ce que tu as fait jusqu'à notre jours-là pour assurer l'éducation et la formation de tous tes enfant .Je me rappel vraiment de tous tes efforts avec moi dès mon jeune âge, chère mère j'avoue vraiment que tu étais pour moi la lumière qui me guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite, c'est grâce à toi que je dois toute ma réussite. J'espère que mon travail sera le témoignage de ma gratitude et mon respect le plus profond.

- *A mes chères sœurs :*
 - *NOUR EL IMEN et son mari ROCHDI En n'oubliant pas ses anges : NIDHAL et AROUA*
 - *MAROUA.*
 - *SABA.*
- *Ainsi qu'à toute ma famille.*
- *A tous ceux qui me sont chers.*
- *A mes chers amis et amies.*
- *A toutes mes collègues de la promotion Master 2020.*

GHOUBANE RYM

ملخص:

التقسية الصلبة تعني حماية الأجزاء المعرضة لأنواع مختلفة من التآكل، بحيث تحقق مقاومة معينة أو خصائص معينة ضد التآكل.

مع التطور التكنولوجي، زادت الحاجة إلى تراكب اللحام عالي الجودة، حيث تحتاج الصناعات المتقدمة والمهمة إلى أجزاء موثوقة.

لقد قمت بتحليل هذا المقال "تأثيرات طبقة اللحام على البنية المجهرية الصلبة لكربيد التنجستن" بهدف إظهار أن زيادة عدد الطبقات سيزيد من صلابة المنطقة غير الكربيدية (المصفوفة) المتزايدة. وبالتالي الصلابة الكلية للصلابة. سيوفر هذا مقاومة تآكل أفضل للغطاء الصلب.

يتم استغلال الحفاظ على خصائص إعادة الشحن في عدة مجالات مثل: الصناعات الخفيفة والثقيلة، صناعة البتروكيماويات ...

Résumé :

Le rechargement dur signifie la protection des pièces qui sont exposées à différents types d'usure, pour qu'il obtienne une certaine résistance ou des caractéristiques spécifiques contre l'usure.

Avec le développement technologique, le besoin d'un rechargement par soudage de haute qualité a augmenté, car les industries avancées et importantes ont besoin des pièces fiables.

J'ai analysé cet article « Effets de la couche de soudure sur la microstructure de rechargement dur en carbure de tungstène » à l'objectif de montrer que l'augmentation du nombre de couches augmentera la dureté de la région non carbure (matrice) augmentant ainsi la dureté globale du rechargement. Cela fournira une meilleure résistance à l'usure du rechargement dur.

Le maintien de les caractéristiques du rechargement est exploité dans plusieurs domaine tel que : l'industrie légère et lourd, industrie pétrochimique ...ex

Abstract :

Hardfacing means protecting parts that are exposed to various types of wear, so that they achieve certain resistance or specific characteristics against wear.

With technological development, the need for high quality weld overlay has increased, as advanced and important industries need reliable parts.

I analyzed this article "Effects of the solder layer on the tungsten carbide hardfacing microstructure" with the objective of showing that increasing the number of layers will increase the hardness of the non-carbide region (matrix) increasing. thus the overall hardness of the hardfacing. This will provide better wear resistance of the hardfacing.

The maintenance of the characteristics of the recharging is exploited in several fields such as: light and heavy industry, petrochemical industry ... ex

Table des matières

Remercîments

Dédicaces

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : LE RECHARGEMENT

I.1. Définition	1
I.2. Utilisation et application	2
I.3. Les techniques employées en industrie	2
I.4. Les raisons du rechargement.....	2
I.5. Les matériaux (nuance) favorables pour le rechargement	3
I.5.1. Aciers pour constructions soudées	3
I.5.2. Aluminium	4
I.5.3. Acier inoxydable	4
I.5.4. Autre matériaux	7

CHAPITRE II : LE RECHARGEMENT PAR SOUDAGE

II.1. Définition	8
II.2. Destination de rechargement	9
II.3. Les matériaux (nuance) appropriés pour le rechargement	9
II.3.1. Aciers	10
II.3.2. Aciers inoxydables martensitiques	10
II.3.3. Aciers austénitiques au chrome – manganèse	10
II.3.4. Aciers inoxydables austénitiques	11
II.3.5. Alliages à base de nickel	11
II.3.6. Alliages à base de cobalt	12
II.4. Traitements thermiques du rechargement par soudage	13
II.4.1. Introduction	13
II.4.2. Cycle d'un traitement thermique	13
II.4.3. Traitements thermiques des soudures	14
II.4.3.1. Objet et mise en œuvre des traitements thermiques.....	14
Classification selon l'objet	14

Modes de mise en œuvre	14
II.4.3.2. Traitement de relaxation.....	16
a) Objet	16
b) Mécanisme de la relaxation	16
c) Effets métallurgiques du traitement	19
d) Fissuration au réchauffage	20
e) Traitement avant ou après refroidissement.....	22
II.4.3.3. Recuit de normalisation	22
II.4.3.4. Recuit de dégazage.....	23
II.5. L'influence d'éléments d'addition sur la soudabilité	24
II.5.1. Le carbone	24
II.5.2. Le manganèse	24
II.5.3. Influence du chrome (Cr)	25
II.5.4. Influence du Nickel (Ni)	26
II.5.5. Le molybdène	27
II.5.6. Cuivre (Cu)	27
II.5.7. Aluminium (Al)	27

CHAPITRE III : LE SOUDAGE

III.1. Théorie du soudage	28
III.1.1. Le soudage de nos jours	28
III.1.2. Définition du soudage.....	29
III.1.3. Caractéristique de soudage.....	29
Métal de base (MB)	29
Zone affectée thermiquement (ZAT)	29
La zone de fusion (ZF) mélange homogène	29
La zone de fusion (ZF) non mélangée	30
Zone de fusion partielle (ZFP)	30
III.2. La métallurgie du soudage :.....	30
III.2.1. Le diagramme de Schaeffler	30
III.2.2. Aspects métallurgiques de la zone soudée.....	32
III.2.2.1. Zone de fusion (structure basaltique)	33
III.2.2.2. Zone surchauffée	33
III.2.2.3. Zone de normalisation	34
III.2.2.4. Zone à température maximale comprise entre Ac1 et Ac3	34
III.2.2.5. Zone de recristallisation	34
III.2.2.6. Métal de base	34

III.2.3. Cycle thermique de soudage	35
a) Période de chauffage.....	35
b) Période de refroidissement	35
III.3. La métallurgie du soudage	36
III.3.1. Principaux procédés de soudage.....	36
III.3.2. Soudage à l'arc submergé (SAW).....	37
III.3.2.1. Flux et matériau d'apport.....	40
III.3.3. Influence des paramètres en soudage à l'arc submergé.....	43
CHAPITRE VI : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE D'UN ARTICLE ANTERIEUR	
IV.1. Effets de la couche de soudure sur la microstructure de rechargement dur en carbure de tungstène	47
IV.1.2. Les conditions et les méthodes expérimentales utilisées	47
IV.1.2.1. Préparation des échantillons.....	47
IV.1.2.1.1. Lame et électrode.....	47
IV.1.2.1.2. Méthode de rechargement et état de soudage	48
IV.1.2.1.3. Coupe transversale de l'échantillon.....	49
IV.1.2.2. Résultats et discussion	50
IV.1.2.2.1. Effet de la couche de soudure sur la croissance du carbure	50
IV.1.2.2.2. Analyse de microdureté.....	52
IV.1.3. Conclusion	53
PARTIE EXPEREMENTALE	
1. Présentation de l'entreprise	54
2. Organigramme de l'entreprise	54
3. Unité fabrication	55
4. Atelier mécanique, atelier d'usinage	55
5. Service usinage	56
CONCLUSION GENERALE	
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Liste des Figures

Figure	Titre	Pages
Figure I.1	Différents types de traitement de surface et rechargement	01
Figure I.2	soudure de l'aluminium	04
Figure II.1	Réparation la pièce avariée	08
Figure II.2	Rechargement de support de cylindrique	12
Figure II.3	Cycle d'un traitement thermique	13
Figure II.4	Mécanisme de la relaxation des contraintes (d'après [7])	17
Figure II.5	La variation de H en fonction de la température (d'après [7])	18
Figure II.6	Fissuration du joint de liaison (d'après [7])	21
Figure II.7	Recuit de normalisation	23
Figure II.8	Influence du manganèse sur la soudabilité	25
Figure II.9	(a) Effet des éléments d'alliage sur la courbe de polarisation anodique ; (b) Effet des éléments d'alliage sur la formation des différents précipités.	26
Figure II.10	Influence du Nickel sur diagramme ternaire Fe-Cr-Ni	26
Figure II.11	Micro dureté d'alliage de rechargement dur à base de nickel	27
Figure III.1	Les zones de soudage	29
Figure III.2	le diagramme de schaeffler	31
Figure III.3	les zones à risque sur le diagramme de schaeffler	31
Figure III.4	Représentation schématique d'un joint soudé	33
Figure III.5	Transformations structurales dans la ZAT : représentation schématique et micrographies. Dans la Zone1 : $\theta < 600^\circ$ et dans la Zone3 : $Ac3 > \theta > Ac1$ et dans la (zone de liaison) Zone2 : $\theta > 1200^\circ$ structure à gros grains	34
Figure III.6	structure de weidmannstaten	35
Figure III.7	Cycle thermique de soudage	36
Figure III.8	Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie	37
Figure III.9	Soudage sous flux en poudre	39
Figure III.10	Principe du procédé de soudage sous flux en poudre	39
Figure III.11	Effet du courant de soudage sur l'aspect de la soudure.	44

Figure III.12	Taux de dépôt moyen en soudage sous flux	44
Figure III.13	Effet de la tension d'arc sur l'aspect de la soudure	45
Figure III.14	Influence de la vitesse de soudage sur la forme du cordon	46
Figure IV.1	Lame en acier au carbone à revêtement dur.	47
Figure IV.2	Schéma de principe du dépôt de rechargement dur sur lame en acier au carbone.	48
Figure IV.3	(a) Vue schématique de l'échantillon en coupe de la lame en acier au carbone et (b) position schématique en coupe de l'échantillon pour l'épaisseur du revêtement et les analyses MEB.	50
Figure IV.4	Microstructure de la région de revêtement globale pour un nombre différent de couches de soudage.	51
Figure IV.5	Microstructure de la région sans carbure (matrice) pour un nombre différent de couches de soudage.	51
Figure IV.6	Valeur de dureté pour différentes régions de l'échantillon de lame en acier au carbone à face dure.	52
Figure IV.7	Valeur de dureté de la région sans carbure (matrice) pour différents nombres de couches de soudage	53
Figure 1	Les AMM	54
Figure 2	organigramme de l'AMM	54
Figure 3	Découpage zonal des AMM	55
Figure 4	Plan pour l'atelier d'usinage	56
Figure 5	Rechargement un rouleau	58
Figure 6	pièce réparée	59
Figure 7	machine de rechargement par soudage Weldclad	59
Figure 8	Projection latérale de la machine	60

Liste des Tableaux

Tableaux	Titre	Pages
Tableau I.1	Critères de choix des aciers inoxydables à partir de leurs caractéristiques principales (Source : Memotech Structures Métalliques)	06
Tableau IV.1	Composition élémentaire de l'acier au carbone BS3100.	48
Tableau IV.2	Composition élémentaire de l'électrode en carbure de tungstène (WC).	48
Tableau IV.3	Conditions de soudage utilisant la méthode de soudage SMAW.	49
Tableau IV.4	Échantillons avec un nombre différent de couches de soudage	49
Tableau 1	Nomenclature des éléments constitutifs de la machine	60

Introduction générale :

De nombreuses pièces dans des domaines industriels différents sont exposées à l'usure. Cette usure fait perdre à ces pièces leurs dimensions initiales et par conséquent les mécanismes et les systèmes mécaniques auxquelles elles appartiennent ne fonctionnent plus normalement.

Economiquement parlant jeter ces pièces usées et les échanger par des pièces neuves revient très chers.

Parmi l'ensemble des solutions disponibles à travers les ateliers du monde industriel pour renforcer la tenue de ces pièces à l'usure, des techniques de rechargement occupent une place à part. Cette opération de réparation est un service qui passe nécessairement par la maîtrise d'un grand nombre de savoir-faire technique et aussi la maîtrise de paramètres métallurgiques complexes et impose des contraintes de réalisation dont la méconnaissance en rend les résultats aléatoires.

Le procédé de réparation est une technique utilisée à l'heure actuelle pour différentes applications :

- Reconstruction aux dimensions voulues de zones détériorées par usure.
- Réparation de pièces dégradées par corrosion et / ou oxydation.
- Réparation de pièces dégradées par fissuration et par fatigue.
- Réparation de pièces dégradées par chocs thermiques.

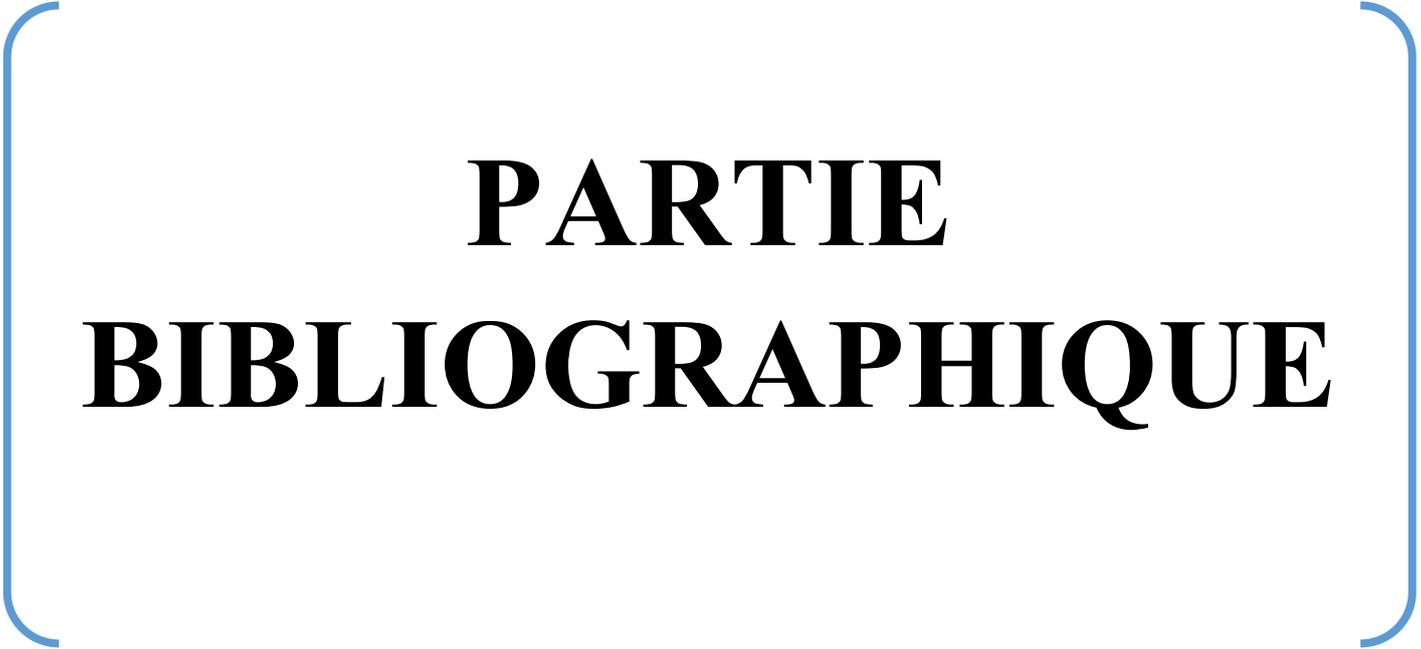
La plus part des matériaux métalliques peuvent être rechargés : aciers inox, aciers, aluminium, cuivre, bases de cobalt, bases de nickel ...

En principe en rechargeant ces pièces avec un métal d'apport approprié, les dépôts présenteront des caractéristiques identiques à celles d'origine.

Nous avons présenté ce travail comme suit :

- Une introduction générale
- Une partie bibliographique :
 - Chapitre I : le rechargement
 - Chapitre II : le rechargement par soudage
 - Chapitre III : le soudage
 - Chapitre IV : analyse bibliographique d'un article antérieur
- Une partie expérimentale

Le tout est clôturé par une conclusion générale.



PARTIE
BIBLIOGRAPHIQUE



CHAPITRE I :

LE RECHARGEMENT

CHAPITRE I : LE RECHARGEMENT

I.1. Définition :

Le rechargement est une technique qui consiste à recouvrir tout ou une partie d'une pièce métallique par un matériau (métal, céramique, gomme, etc...) ayant les propriétés requises pour résister à une sollicitation connue et définie. Deux buts sont à envisager :

- Remplacer un fragment de métal usé ou cassé : il s'agit d'un simple soudage entre la pièce à réparer et un métal d'apport ressemblant le plus possible au métal de base (dépôt par soudage) ;
- Recouvrir une partie de la pièce d'un métal différent ayant des propriétés intéressantes : anti usure, anti corrosion etc... (dépôt par projection).

La recharge étant en général plus dur et moins élastique que le métal de base, il peut s'ensuivre des tensions au niveau de la zone de contact, il est préférable de prévoir un rechargement en deux ou plusieurs couches de dureté croissantes vers l'extérieur.

La surface à recharger doit être :

- Dégraisser et décapée ;
- Sans angles vifs.

Il est préférable de préchauffer (prévention de déformations ultérieures), et de faire refroidir lentement.

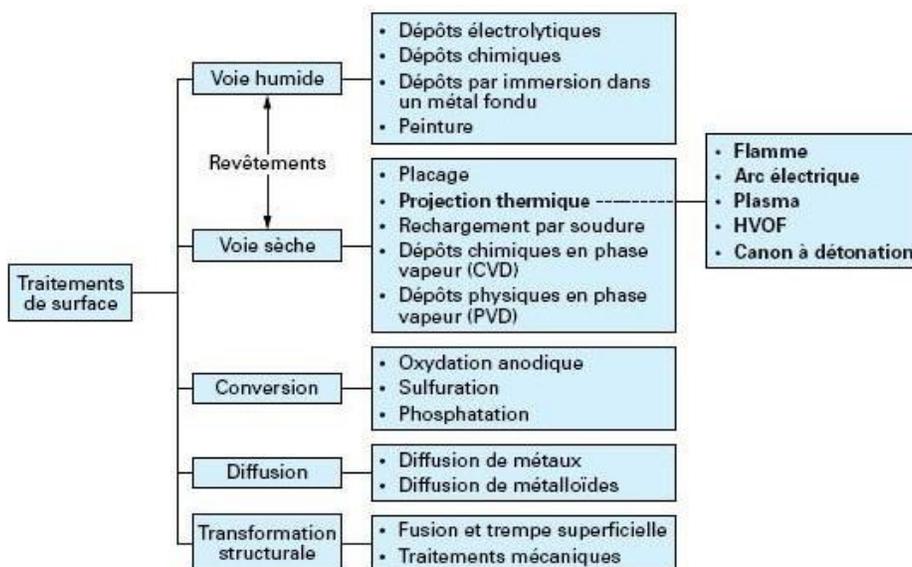


Figure I.1 : Différents types de traitement de surface et rechargement [01]

I.2. Utilisation et application :

- Industrie légère et lourde (aciers non alliés).
- Appareils à pression (aciers faiblement alliés).
- Pipemills (tous grades d'aciers).
- Offshore (aciers faiblement alliés).
- Industrie pétrochimique (aciers inoxydables/base nickel).

I.3. Les techniques employées en industrie :

Les trois principales techniques de rechargement sont le rechargement par projection, par soudage et par explosion (placage par explosion). En règle générale le rechargement est envisagé soit lors de la conception d'une pièce et/ou soit lors de sa maintenance.

Les rechargements sont effectués pour améliorer la résistance à diverses sollicitations telles que le choc, l'abrasion métallique ou minérale, le frottement, la pression (laminage), la cavitation, la corrosion et/ou une combinaison de ces sollicitations y compris aussi pour des raisons esthétiques. Lors de rechargement par soudage, pratiquement tous les procédés sont utilisables. Selon la nature et les propriétés recherchées après rechargement, celui-ci peut être effectuée en couches successives de nuances appropriées jouant un rôle de transition depuis les propriétés métallurgiques, chimiques, mécaniques du substrat vers celles requises en final.

I.4. Les raisons du rechargement

Le rechargement peut être vu comme le moyen de protéger localement un élément ou une partie d'élément contre les agressions rencontrées pendant la durée de vie normale de la pièce. Le rechargement est donc une réponse précise apportée à un mode de sollicitation identifié.

Exemples d'agressions pouvant être combattues par un rechargement dur :

- Rechargement résistant à la corrosion déposé par feuillard au moyen du procédé Electrostal (ESW).
- Abrasion métallique à haute température (outils de travail à chaud, pièce de pompe, équipement de sidérurgie), dont la dureté du rechargement peut aller jusqu'à 500HB (dureté Brinell) ;

- Abrasion métallique (lame de cisaille, poinçon et matrice de presse découpée, outil de presse à former, piston), dont la dureté du rechargement peut aller jusqu'à 55HRc (dureté Rockwell) ;
- Abrasion minérale (équipements agricoles, manutention de sables / bétons, broyeur, mélangeur), dont la dureté du rechargement peut aller jusqu'à 70FIRc (dureté Rockwell) ;
- Choc, abrasion, pression (équipements de terrassement, d'excavation, chemins de roulement, burins mécaniques), dont la dureté du rechargement peut aller jusqu'à 651-Mc (dureté Rockwell) ;
- Choc (cœur d'aiguillage, outil de percussion, marteau, batteur de pieux), dont la parade peut consister en un rechargement en acier à 13 % de manganèse (acier auto durcissant) ;
- Corrosion (surfaces exposées aux agressions chimiques : équipements sous pression, éléments de chaudières), dont la parade consiste, en général, en un revêtement d'acier inoxydable de nuance appropriée.

I.5. Les matériaux (nuance) favorables pour le rechargement :

Parmi les meilleurs métaux pour le rechargement on a :

- ❖ Aciers de construction
- ❖ Aluminium
- ❖ Acier inoxydable
- ❖ Autres métaux

I.5.1. Aciers pour constructions soudées :

Les aciers pour constructions soudées doivent d'abord avoir une bonne soudabilité. De plus, il est nécessaire qu'ils aient une limite élastique assez élevée et ils ne doivent pas être susceptibles de rupture par fragilité. Ces aciers contiennent en général :

- Une faible teneur en carbone (0,15 à 0,22) % cause des exigences de soudabilité.
- Une teneur relativement élevée en manganèse à cause des exigences de résistance mécanique.
- Eventuellement de faible addition de chrome et de molybdène.

Les aciers pour constructions soudées sont très employés en construction, métalliques soudées et en chaudronnerie, notamment, dans le domaine ferroviaire comme : X6CrNiTi12

I.5.2. Aluminium [02] :

Bien qu'il puisse être plus sensible que l'acier à faible teneur en carbone, l'aluminium peut être soudé sans trop de difficultés tant que vous avez les connaissances et les techniques nécessaires. L'une des préoccupations lors du soudage de l'aluminium est de s'assurer que le grade correct est choisi. Les nuances de la série 1XXX peuvent être soudées sans trop d'effort supplémentaire. Les nuances de la série 6XXX peuvent être soudées, mais un processus de remplissage et de soudage doit être utilisé pour éviter les fissures. L'aluminium de la série 2XXX n'est généralement pas soudable du tout, bien que certaines nuances de cette série puissent être soudées avec des matériaux et une technologie appropriés.

Une autre considération lors du soudage de l'aluminium est la résistance du matériau. Certains alliages d'aluminium, tels que ceux classés T6, ont été développés artificiellement pour augmenter la résistance. Cela signifie qu'il a été chauffé à une certaine température pendant une période de temps spécifique de sorte que les dépôts minéraux ont la taille et la forme requises pour augmenter la résistance de l'aluminium. Lorsque ces qualités d'aluminium sont soudées, la face métallique est précipitée dans un changement de forme et il est courant que la résistance de l'aluminium soit fortement réduite. Pour restaurer cet alliage d'aluminium soudé à sa résistance initiale, il doit être vieilli artificiellement par un processus de traitement thermique.

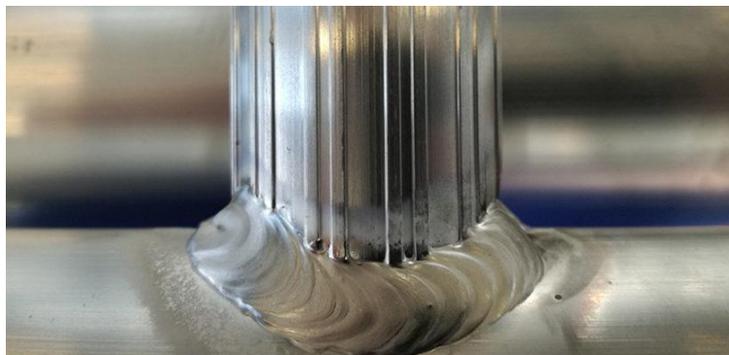


Figure I.2 : soudure de l'aluminium

I.5.3. Acier inoxydable [02] :

L'acier inoxydable est un métal qui peut également être soudé facilement lorsqu'une technique appropriée est utilisée et que des connaissances adéquates sont appliquées. De

nombreux aciers inoxydables, connus pour leur résistance à la corrosion, peuvent être soudés malgré leur composition chimique complexe. La considération la plus importante lors du soudage d'un acier inoxydable est de savoir quelle nuance est soudée. Il existe trois principaux types d'acier inoxydable : austénitique, ferritique et martensitique. De nombreux aciers inoxydables ferritiques sont très soudables. Les aciers inoxydables austénitiques peuvent également être soudables. Les aciers inoxydables martensitiques sont généralement plus difficiles en raison de leur dureté élevée et de leur propension à se fissurer.

La corrosion intergranulaire est une considération majeure lors du soudage des aciers inoxydables. Lorsque les aciers inoxydables sont soumis à des environnements à haute température, comme ceux qui se produisent pendant le soudage, le chrome peut être susceptible de se joindre au carbone dans l'acier. Cette formation de carbure de chrome empêche la capacité du chrome à se combiner avec l'oxygène. Par conséquent, aucune couche d'oxyde de chrome n'est formée et l'oxygène est libre de se combiner avec le fer dans l'acier inoxydable, contribuant à la corrosion. Il existe quelques méthodes disponibles pour éviter cela. L'utilisation d'une nuance stabilisée avec du titane ou du niobium telle que la nuance 321 peut empêcher la corrosion intergranulaire car le titane est plus susceptible de se former avec les atomes de carbone avant le chrome. Un autre moyen de prévenir la corrosion intergranulaire consiste à utiliser des aciers inoxydables à faible teneur en carbone. Ceux-ci n'offrent tout simplement pas assez de carbone pour arrêter la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome.

Désignation européenne selon NF EN 10088-2	Désignation numérique	Aptitude à la conformation à froid (pliage, emboutissage, profilage)	Soudabilité	Résistance à la corrosion	Particularités	Exemples d'applications
ACIERS INOXYDABLES MARTENSITIQUES						
X20Cr13	1.4021	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne	Bonne aptitude à la trempe	<ul style="list-style-type: none"> - Outils tranchants - Coutellerie - Pièces mécaniques - Outils de bâtiment
X30Cr13	1.4028	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne		<ul style="list-style-type: none"> - Feuillards de rechargement

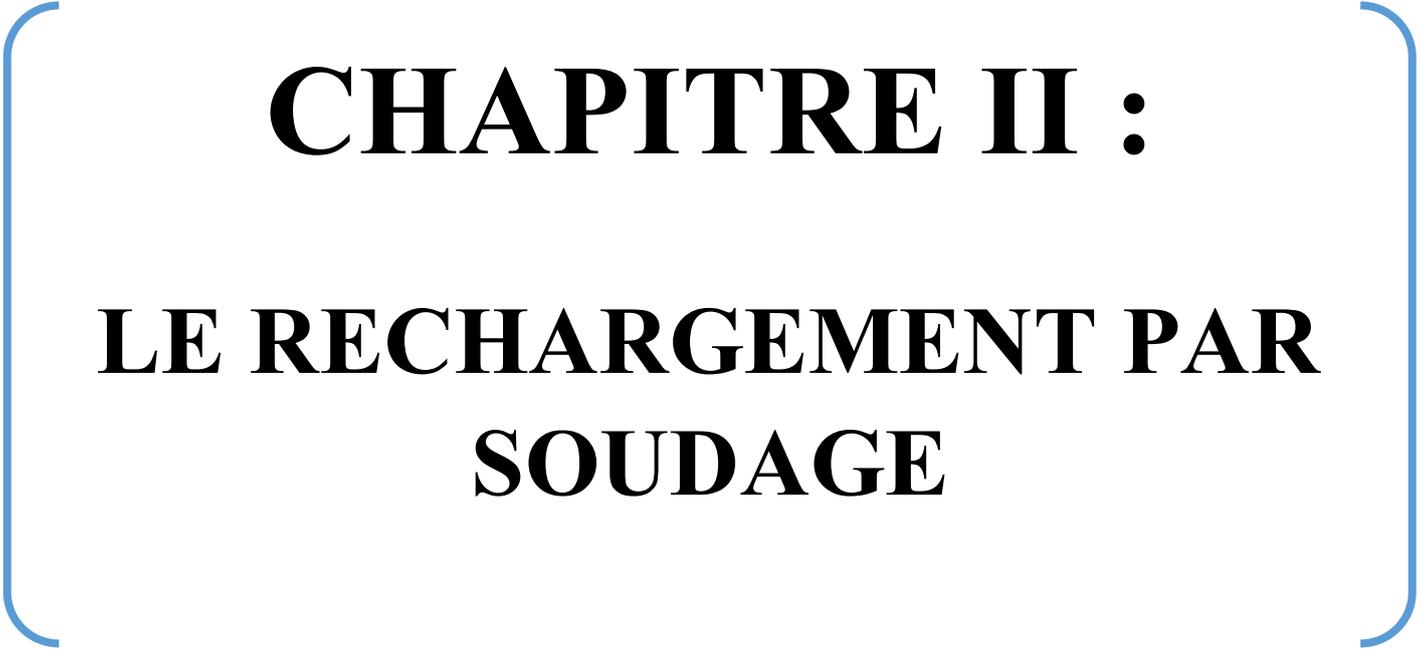
							- Coutellerie - Outils tranchants Pièces d'usure
X46Cr13	1.4034	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne			- Coutellerie - Instruments de chirurgie
ACIERS INOXYDABLES FERRITIQUES							
X2CrTi12	1.4512	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Résistance à la corrosion moyenne	Bonne résistance à l'oxydation à chaud		- Système d'échappements automobiles
X6CrNiTi12	1.4516	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Bonne soudabilité	Résistance à la corrosion moyenne	Nuance pour construction soudée		- Conteneurs - Matériels ferroviaires - Trémies - Equipements industriels.
X6Cr17	1.4016	Mise en oeuvre par conformation moyenne	Soudabilité moyenne	Résistance à la corrosion moyenne	- En recuit brillant pour pièces d'aspect - Flans monétaires		- Articles ménagers - Pièces décoratives - Electroménager - Platerie
X3CrTi17	1.4510	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Bonne résistance à la corrosion	- Le Titane améliore la soudabilité et la déformation à froid		- Electroménager - Eviers - Tubes - Bruleurs
X6CrNi17-1	1.4017	Mise en oeuvre par conformation difficile	Soudabilité difficile	Résistance à la corrosion moyenne	- Caractéristiques mécaniques élevées après trempe et écrouissage		- Chaines transporteuses
X2CrMoTi18-2	1.4512	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Résistance à la corrosion par piqûres identiques à celles du 18-11 ML (316L)		- Ballons d'eau chaude - Chaudières de fumées - Echangeurs divers.
ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES							
X10CrNi18-8	1.4310	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Bonne soudabilité	Bonne résistance à la corrosion	- Nuance écrouissage		- Ressorts - Pièces mécaniques
X2CrNi18-7	1.4318	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance	- Caractéristiques améliorées à l'état écroui		- Matériel ferroviaire

				à la corrosion		
X5CrNi 18-10	1.4301	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Très bonne soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance conforme à toutes les normes	- Chaudronnerie - Tubes - Cuves - Platerie - Ustensiles de cuisson
X2CrNi18-9	1.4307	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance très bas carbone. - Bonne aptitude au soudage	- Chaudronnerie - Nucléaire - Métal déployé - Echangeurs
X2CrNi19-11	1.4306	Très facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Nuance très bas carbone - Affecté au nucléaire - Carbone <0,2	- Chaudronnerie - Nucléaire
X6CrNiTi18-10	1.4541	Facile à mettre en oeuvre par conformation	Excellente soudabilité	Très bonne résistance à la corrosion	- Stabilisé Titane - Résistance à la corrosion des zones soudées - Résistance au fluage	- Tubes - Résistances chauffantes - Aéronautique

Tableau I.1 : Critères de choix des aciers inoxydables à partir de leurs caractéristiques principales (Source : Memotech Structures Métalliques) [03]

I.5.4. Autre matériaux [02] :

Bien qu'il y ait des exceptions, le soudage a tendance à se compliquer avec d'autres types de métaux. Le soudage du titane nécessitera généralement un équipement supplémentaire ou un blindage pour l'empêcher de s'oxyder. Les aciers à haute teneur en carbone nécessitent généralement un traitement thermique de préchauffage et de post-soudage pour éviter la fissuration. Certains super alliages ne peuvent être soudés que sous vide. Chaque métal qui va être soudé doit être recherché sur une base individuelle pour s'assurer que des méthodes de soudage existent pour réaliser une soudure réussie.



CHAPITRE II :
LE RECHARGEMENT PAR
SOUDAGE

CHAPITRE II : LE RECHARGEMENT PAR SOUDAGE

II.1. Définition :

Historiquement, le rechargement par soudage évoquait immédiatement la notion de réparation, par la suite, cette notion a été intégrée dans la conception afin de limiter les zones où le métal doit avoir des propriétés particulières (par exemple rechargement dur ou inoxydable) et utiliser des matériaux de moindre coût pour le reste de la construction. Le rechargement est une technique, selon la nature du substrat, métallurgique ou chimique qui consiste à revêtir une pièce ou une partie de pièce d'un matériau ayant les propriétés requises pour résister à une sollicitation connue et définie. En règle générale le rechargement est envisagé soit lors de la conception d'une pièce et/ou soit lors de sa maintenance, les technologies de rechargement permettent d'allonger de façon significative la durée de vie de pièces très fortement sollicitées en service.

Le rechargement par soudage à l'arc est une technique de revêtement destinée à augmenter la durée de vie et la performance des composants industriels, en préventif sur des pièces neuves, ou dans le cadre d'un programme de maintenance. De nombreuses industries ont adopté ce procédé en raison des économies significatives qu'il génère en réduisant les arrêts et les coûts de production. A chaque application correspond un fil fourré de rechargement spécifiquement développé ou adapté [4].



a) Pièce avant rechargement



b) Pièce après rechargement

Figure II.1 : Réparation la pièce avariée [5]

En raison de leur grande facilité et flexibilité de mise en œuvre, les fils fourrés sont utilisés dans tous les environnements, en atelier, en chantiers sur site, en conception ou en réparation.

Un même alliage peut être déposé par différents procédés de soudage :

- Soudage sans gaz (O)

- Soudage avec gaz – MIG – MAG (G)
- Soudage avec arc submergé (S)
- Projection thermique

Les fils fourrés Welding Alloys sont produits dans le cadre d'un programme d'assurance qualité certifié ISO 9001 version 2000.

Les procédés les plus utilisés pour le rechargement dur sont [4] :

- **Soudage à l'électrode enrobée, SMAW**

Aussi connue comme Manual Metal Arc Welding (MMA)

- Couvre le plus grand nombre des métaux d'apport
- N'est pas onéreux
- C'est un procédé universel pour le travail sur chantier et pour toutes les positions

- **Soudage avec fil fourré, FCAW**

- La diversité d'alliage est à peu près la même que les électrodes enrobées
- Taux de dépôt élevé
- Peut être utilisé sur chantier (sans gaz)
- Pas de protection gazeuse nécessaire ou gaz spéciaux

- **Soudage à l'arc sous flux, SAW**

- Gamme des produits limitée
- Taux de dépôt élevé approprié pour de grandes pièces à recharger
- Pas d'arc visible, ni projections

II.2. Destination de rechargement :

Le rechargement par soudage est une technique de revêtement destinée à :

- Prolongement de la durée de vie des pièces ;
- Réduction du nombre de pièces de rechange requises ;
- Meilleure efficacité opérationnelle grâce à la réduction des temps morts ;
- Réduction du coût des matériaux de base à utiliser ;
- Réduction générale des coûts.

II.3. Les matériaux (nuance) appropriés pour le rechargement :

Les métaux d'apport pour le rechargement peuvent être classés dans des groupes spécifiques concernant leurs caractéristiques et leur résistance contre l'usure.

II.3.1. Aciers :

Les aciers non alliés à faible teneur en carbone, type S ou E, ont une bonne soudabilité. Même remarque pour les aciers inoxydables à condition que le pourcentage de carbone (% C) reste inférieur à 0,05 %. Pour les C et les aciers faiblement alliés, le carbone est l'élément le plus défavorable au soudage dans la mesure où il favorise la trempe. La soudabilité peut être estimée par la méthode du carbone équivalent C exprimé en pourcentage de masse.

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

- Si $C_{eq} \leq 0,4$: l'acier est parfaitement soudable à température ambiante.
- $0,45 \leq C_{eq} \leq 0,7$: l'acier est moyennement soudable ; préchauffage de 100 à 400 °C.
- $C_{eq} > 0,7$: l'acier est difficilement soudable ; préchauffage, électrodes spéciales, traitements thermiques...

Exemples :

- C35 (0,35 % C et 0,6 % Mn) : $C_{eq} = 0,35 + 0,6/6 = 0,45$ (moyennement soudable)
- 35NiCr18 : (0,35 % C, 4,5 % Ni, 1,7 % Cr, 0,8 % Mn) : $C_{eq} = 0,35 + 0,8/6 + 1,7/5 + 4,5/15 = 1,12$ (acier difficilement soudable).

II.3.2. Aciers inoxydables martensitiques

Dans certaines applications, les aciers martensitiques conventionnels peuvent faillir à la tâche si la température est élevée et le milieu ambiant quelque peu corrosif. Les aciers inoxydables martensitiques possèdent un contenu en chrome plus élevé, ce qui leur confère une résistance à l'oxydation adaptée à un usage à plus haute température et une bonne résistance à la corrosion en vertu de la couche d'oxyde passive qui se forme à la surface de ces alliages. Tout comme les aciers martensitiques conventionnels, les aciers inoxydables martensitiques possèdent une très bonne résistance aux chocs et au frottement métal-métal. Ces alliages conservent aussi une bonne dureté à chaud et ils sont aussi très résistants aux chocs thermiques. De plus, ils peuvent aussi être appliqués en dépôts multi-couches, mais nécessitent généralement une préchauffe du métal de base.

Exemple : X30Cr13 (0.30 C, 13 Cr)

Le carbone équivalent : $C_{eq}=2.9$ Soudabilité difficile

II.3.3. Aciers austénitiques au chrome – manganèse

Ces aciers au manganèse enrichis avec beaucoup de chrome présentent une plus grande stabilité microstructurale. Même avec une dilution importante avec l'acier au carbone,

ces aciers conservent leur structure austénitique. Ces alliages peuvent donc servir à joindre les aciers au manganèse entre eux ou avec des aciers au carbone. De plus, ces métaux d'apport sont d'excellentes sous-couches pour les alliages de rechargement plus durs car ils minimisent l'appauvrissement en carbone et en chrome de l'alliage de surface. Ils ont une résistance modérée à l'abrasion et ils ont aussi la propriété de se durcir superficiellement très rapidement après des chocs répétés, ce qui leur confère une résistance à l'impact supérieure.

Bien que leur microstructure soit plus stable que celle des aciers au manganèse réguliers, ils ne doivent pas être exposés à des températures supérieures à 260°C pour éviter la précipitation fragilisante de carbures.

II.3.4. Aciers inoxydables austénitiques :

Ces alliages, comme leur nom l'indique, sont très résistants à l'oxydation et à la corrosion. Leur bonne résistance à la corrosion s'explique par la formation d'une couche d'oxyde passive très adhérente. Ils n'ont cependant qu'une très faible résistance à l'abrasion. Les aciers inoxydables austénitiques sont aussi très ductiles et tenaces, ce qui leur confère une bonne résistance à l'érosion à fort angle d'impact en particulier à haute température. Ces alliages peuvent aussi se durcir à l'écrouissage, ce qui leur permet de résister très bien à la cavitation. L'application de plusieurs couches de ce type d'alliages ne présente pas de problème.

Exemple : X6CrNiTi18-10 (0.08 C, 18 Cr, 11 Ni)

Le carbone équivalent : $C_{eq}=0.12$ parfaitement soudable

II.3.5. Alliages à base de nickel

Lorsqu'une pièce est soumise à des conditions d'usure à haute température ou dans un milieu propice à la corrosion ou à l'oxydation, il peut s'avérer avantageux de remplacer les alliages de rechargement dur à base de fer avec des alliages à base de nickel. Les alliages de type nickel-chrome-silicium-bore sont les plus utilisés pour le rechargement dur. Ils possèdent une très bonne résistance à l'oxydation ($T < 850^{\circ}\text{C}$) et une bonne résistance à la corrosion en milieu salin, mais ont par contre une faible résistance à l'impact. Ces alliages de type nickel-chrome-silicium-bore possèdent deux caractéristiques distinctives : ils fusionnent à une basse température ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$) et ils sont autodécapants car ils ont la propriété de s'auto-protéger d'une fine couche de borosilicate qui agit comme décapant lors de leur fusion. Ces caractéristiques permettent une déposition facile de ces alliages au chalumeau. Ce type de matériau présente une bonne résistance à l'usure puisqu'il contient plusieurs phases dures

telles que des carbures et des borures de chrome ou de nickel ainsi que certaines phases intermétalliques à base de silicium. La déposition par soudage de ce type d'alliage est susceptible à la formation de fissures de retrait.

Les alliages de type nickel-chrome-molybdène sont durcis par solution solide et peuvent aussi être utilisés pour le rechargement dur. Un dépôt de cette composition est très tenace et se durcit à l'érouissage, il peut donc être utilisé pour résister aux impacts et à l'érosion (à fort angle d'impact) lorsque la pièce doit résister également à des conditions de chaleur, d'oxydation ou de corrosion.

II.3.6. Alliages à base de cobalt

Ces alliages sont constitués d'une matrice de cobalt-chrome-tungstène dans laquelle se retrouvent des carbures complexes. Ce mélange de micro constituant leur permet de résister à l'éraillure, à l'impact, à la corrosion, à l'oxydation, à l'écaillage, à l'érosion, à la cavitation, aux chocs thermiques et modérément à l'abrasion. De plus, ils conservent leurs propriétés jusqu'à des températures pouvant atteindre 1100°C en utilisation non continue. Leur niveau de résistance à l'usure varie de bonne à excellente selon la propriété et selon l'alliage. La déposition de tels alliages nécessite généralement une préchauffe et une sous-couche ductile compatible pour éviter l'arrachement des dépôts soudés.

Exemple : CoCr28Mo (0.14 C, 28 Cr, 6 Mo, <1 Ni et base cobalt)

Le carbone équivalent : $C_{eq}=0.20$ parfaitement soudable



Figure II.2 : Rechargement de support de cylindrique [6]

II.4. Traitements thermiques du rechargement par soudage :

II.4.1. Introduction

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage suivi de refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables pour son emploi ou sa mise en forme.

Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques tel que ; l'augmentation de la limite élastique et la diminution de la fragilité.

Toute utilisation rationnelle d'un alliage implique dans la plupart des cas, un traitement thermique approprié. D'une manière générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique mais apporte des modifications de point de vue :

- Constitution (état de carbone, forme allotropique de fer)
- Structure (taille de grain, répartition des constituants)
- Etat mécanique (gradient de température au divers point de la pièce)

II.4.2. Cycle d'un traitement thermique :

En général le traitement thermique comprend 3 étapes : (fig. II.3)

- Un chauffage jusqu'à une température qui dépend du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.

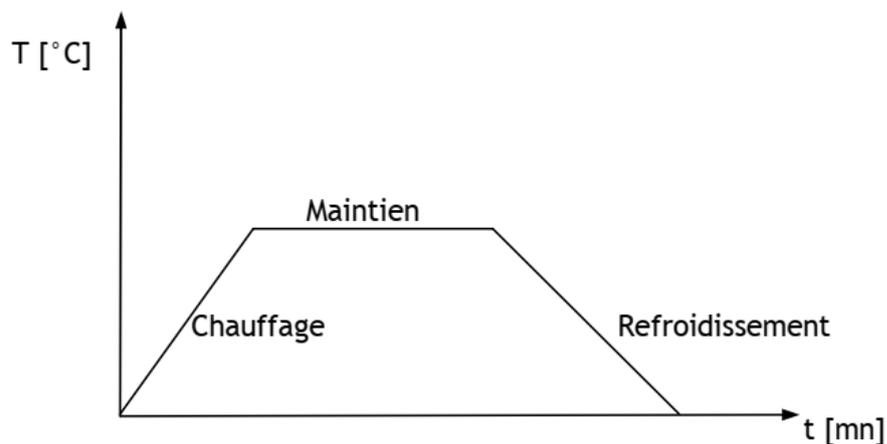


Figure II.3 : Cycle d'un traitement thermique

Toute fois le choix du traitement thermique le plus approprié est en lui-même d'une grande difficulté plus particulièrement dans le choix de ces paramètres, et ce en fonction des structures et des propriétés physiques et mécaniques souhaitées.

II.4.3. Traitements thermiques des soudures :

II.4.3.1. Objet et mise en œuvre des traitements thermiques

a) Classification selon l'objet :

L'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base et, selon les procédés les modes opératoires, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différente de celles de métal de base. D'autre part, l'opération de soudage établit un état de contraintes résiduelles dont la répartition et l'amplitude sont, elles aussi, fonctions de procédés et des modes opératoires.

Qu'elles soient à caractère métallurgique et thermo-mécanique, ces modifications sont souvent tolérables vis-à-vis du comportement de service et les ensembles soudés sont utilisés à l'état brut de soudage. Dans certains cas, cependant, il est jugé préférable ou nécessaire, ou bien encore il est obligatoire d'intervenir par un traitement thermique après soudage, dont l'objet principal peut être d'améliorer ou d'obtenir les propriétés jugés importantes vis-à-vis des conditions de service, ou d'éliminer ou simplement de réduire les contraintes résiduelles. En réalité, compte tenu des rôles multiples que joue tout cycle d'échauffement et de refroidissement, le premier type de traitement destiné à jouer un rôle métallurgique, agit aussi sur l'état de contraintes. Le deuxième à finalité mécanique, a cependant des conséquences métallurgiques. C'est donc en gardant à l'esprit cette interaction que l'on étudiera successivement, ci-dessous, dans le cas des aciers, les types de traitement suivants, sans entrer dans le détail de la nature des sources d'énergie mise en œuvre :

- Traitement de relaxation (ou de détente) et de revenu.
- Traitement de normalisation.
- Traitement de trempe et revenu.

b) Modes de mise en œuvre :

La manière dont sont réalisés les traitements thermiques liés aux soudures ou aux ensembles soudés peut être classée et décrite comme suit :

- Le traitement peut être global, c'est à dire affecter la ou les soudures constitutives de l'ensemble, en même temps que la totalité du métal de base. Une telle action peut être simultanée, c'est – à dire que tout l'ensemble soudé est soumis en même temps, au même cycle de traitement ; ou bien le traitement à lieu de proche en proche, mais pour chaque position qu'elle occupe, la source de chaleur agit simultanément et selon le même cycle sur la soudure et le métal de base non affecté. Le traitement global de proche en proche est illustré par un schéma emprunté à la fabrication des tubes soudés par résistance ou par induction, la source de chaleur, immobile, traite une source entière du tube qui défile, aussi bien le métal de base que la soudure qui vient d'être faite.

Dans la pratique, le traitement global simultané peut être appliqué à tous les objectifs de traitement mentionnés plus haut et à toutes les formes et encombrement d'ensembles soudés compatibles avec les capacités des sources de chaleur mise en œuvre. Le traitement complet étape par étape, qui nécessite un profil fixe du produit à traiter, est principalement pratiqué pour la fabrication de tubes, pour la normalisation ou l'hypertrempe, selon qu'il s'agit d'acier "noir" ou d'acier inoxydable.

- Le traitement local simultané consiste à opérer en même temps sur la totalité d'une soudure et de ses abords et donc sur une partie seulement de métal de base encadrant la zone affectée. Le traitement diffère du traitement local de pas à pas en ce que celui-ci est réalisé au moyen d'une source de chaleur qui se déplace par rapport à la soudure ou l'inverse (l'une immobile, l'autre mobile), pour assurer ce proche en proche l'effet recherché dans le métal fondu est une partie de métal de base incluant la zone affectée. Le traitement local simultané est principalement destiné aux soudures circulaires, qui procurent un effet métallurgique (normalisation ou revenu), ainsi qu'une relaxation, du fait de la consistance qu'il procure. Ce n'est pas le cas de traitement local pas à pas qui, si elle comprend une intervention métallurgique (principalement la normalisation), n'est pas recommandée pour obtenir une relaxation, car qu'il ne fait que remplacer un état de contrainte du au soudage, par un autre, du au traitement lui-même.

En ce qui concerne les traitements thermiques locaux, qu'ils soient simultanés au de proche en proche, ils ne peuvent être pratiqués sans inconvénient que moyennant deux conditions, toutes deux relatives au métal de base, sur lesquelles on reviendra plus loin :

Lors des traitements thermiques de normalisation, la vitesse de refroidissement, donc l'éloignement de la source de chaleur, doit être réglée de sorte que la zone traitée, qui est momentanément austénitisée, ne prenne pas la trempe.

Tout traitement thermique local crée sa propre zone affectée qui remplace la ZAT de la soudure que l'on traite. En raison du gradient thermique inévitable qui y règne, cette région a ses bords. Une bande où le traitement appliqué n'a pas complètement été réalisé, mais où il a créé une modification du métal de base par rapport à son état initial, en particulier un adoucissement si le métal de base est lui-même à l'état initial trempé et revenu.

II.4.3.2. Traitement de relaxation

a) Objet :

Le traitement thermique de relaxation, ou encore de détente a pour objet d'annuler ou d'atténuer les contraintes résiduelles présentes dans un ensemble soudé après son achèvement, ou en cours de construction s'il apparaît nécessaire d'intervenir sur l'état des contraintes avant de poursuivre les opérations de soudage en toute sécurité. Compte tenu de domaine de température, en tous cas inférieurs à celle du point (A1), dans lequel se pratique le traitement de relaxation, il entraîne aussi un effet de revenu, lorsque les soudures contiennent des constituants de trempe, dans la zone fondue comme dans la zone affectée. Cet effet est parfois l'objet principal du traitement qui reste alors pratiqué selon les mêmes techniques. Malheureusement, ce rôle métallurgique supplémentaire n'est pas toujours bénéfique, car des effets défavorables peuvent intervenir, en affectent les propriétés mécaniques ou en provoquant le phénomène de fissuration dit " au réchauffage".

b) Mécanisme de la relaxation

On a déjà indiqué, à propos de l'étude thermique et thermo-mécanique du soudage, que la relaxation thermique des contraintes résiduelles est obtenue grâce à la diminution de la limite d'élasticité provoquée par l'élévation de la température il résulte de cette diminution que toute région d'une pièce ainsi réchauffée qui était le siège d'une contrainte résiduelle à l'ambiante (contrainte évidemment élastique) se plastifie au fur et à mesure de l'échauffement, ce qui fournit l'allongement nécessaire à l'obtention d'un taux de relaxation croissant avec la température du traitement.

Une représentation simplifiée de ce mécanisme peut être obtenue en confrontant sur un même graphique (Fig.II.4) le cycle thermique $\theta = f(t)$ du traitement, la variation $Re = f(\theta)$ de la

limite d'élasticité en fonction de la température et en fin la courbe $\sigma = f(t)$ donnant la variation de la contrainte résiduelle durant le cycle du traitement.

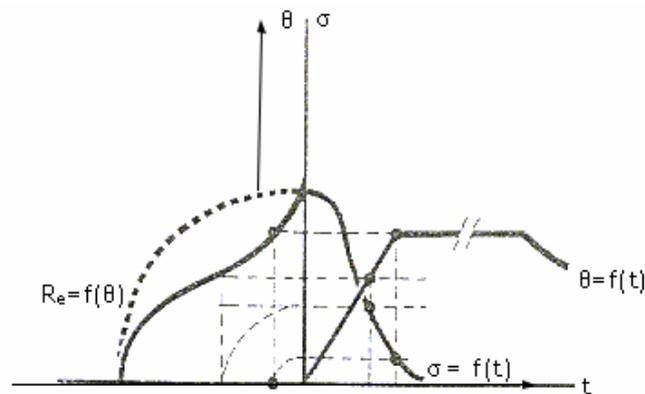


Figure II.4 : Mécanisme de la relaxation des contraintes (d'après [7])

Le taux de relaxation, en première approximation fonction de la seule température de traitement est très faible jusqu'à 200 °c, atteint 50 à 60 % à 500 °c, 70 à 85 % à 575 °c, et 90 à 95 % pour une température de 625 °c, le résultat étant obtenu dès que la température maximale est atteinte. Il n'en reste pas moins que tout traitement thermique doit être spécifié non seulement en terme de température, mais aussi en terme de durée, pour tenir compte, en fonction de l'énergie disponible pour assurer le traitement, de la masse du produit traité et de la nécessité d'homogénéiser la température pour éviter la création de nouvelles contraintes au refroidissement. D'autre part, un certain temps de maintien de la température fixée pour le traitement assure un pourcentage complémentaire de relaxation dans les régions où existent initialement des points de contraintes [8],

Finalement pour définir un traitement thermique en fonction de la température et du temps, et pour en évaluer les effets, du point de vue des contraintes ou Surtout de celui des propriétés mécaniques, on fait appel à un paramètre dit de Hollomon [9].

$$H = T (20 + \log t)/1000$$

Où T est la température de traitement (en degrés K) et t la durée du traitement (en heures). Ce paramètre est utilisé dans la norme précitée pour rendre compte de l'effet du traitement sur les propriétés mécaniques, dont il est fait état dans le paragraphe suivant. La

norme indique à cette effet les valeurs de H (Fig.II.5) correspondant aux diverses combinaisons température / temps.

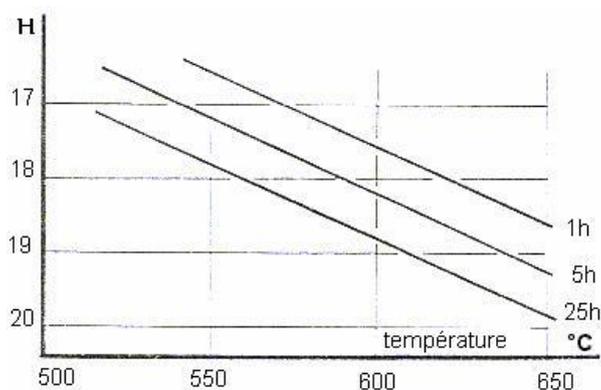


Figure II.5 : La variation de H en fonction de la température (d'après [7])

- **Le paramètre de Hollomon [17] :**

Le paramètre Hollomon-Jaffe, H, est utilisé pour comparer la réponse d'un acier à un traitement de revenu, par ex. traitement thermique post-soudage, en décrivant une équivalence de temps et de température pour les processus activés thermiquement. Par conséquent, le temps nécessaire pour utiliser une température alternative peut être calculée afin de voir s'il s'agit d'une alternative viable à un traitement actuel.

Le paramètre a la forme générale :

$$H = \frac{T(C + \log t)}{1000}$$

Où H est le paramètre Hollomon-Jaffe, T est la température en Kelvin ($^{\circ}\text{C} + 273,15$), C est une constante (voir ci-dessous) et t est le temps en heures pour une condition isotherme.

Hollomon et Jaffe ont déterminé que C varie linéairement pour des teneurs en carbone comprises entre 0,30% et 1,10%. C = 15 convient aux aciers contenant 0,90 à 1,20% de C, et C = 19,5 convient aux aciers contenant 0,15 à 0,45% de carbone. En pratique, C = 20 est couramment utilisé pour les aciers C-Mn et faiblement alliés. Parfois, un facteur plus élevé de 30 a été utilisé pour des aciers plus fortement alliés, par ex. Aciers 9% Cr.

Les cycles de chauffage et de refroidissement peuvent être inclus dans le paramètre, auquel cas l'expression est :

$$H = \frac{T(20 + \log \tau)}{1000}$$

Où

$$\tau = t + \frac{T}{(2.3K1(20 - \log K1))} + \frac{T}{(2.3K2(20 - \log K2))}$$

Où

- t est le temps de maintien en heures,
- K1 = vitesse de chauffe en K / heure,
- K2 = vitesse de refroidissement en K / heure.

Le paramètre Hollomon-Jaffe est similaire au paramètre Larson-Miller, qui était à l'origine utilisé pour décrire les propriétés de fluage, mais utilisait des degrés Rankine plutôt que Kelvin.

c) Effets métallurgiques du traitement :

Le cycle thermique d'un traitement de relaxation étant assimilable à celui d'un traitement de revenu, il n'y a dans l'ensemble pas d'effet sur le métal de base lorsque ce dernier est lui-même mise en œuvre à l'état normalisé et revenu et trempé et revenu, sauf si le traitement à lieu à une température supérieure à celle de revenu initial ; à cet effet on se tient à une température inférieure d'une trentaine de degrés au-dessous. Il faut cependant signaler que certains aciers alliés (au Mn-Mo, au Mn-Ni-Mo, ou encore au Cr-Mo) peuvent être sensible au phénomène dit de fragilité de revenu, qui se produit au cours d'un traitement à 450 – 550 °C ou durant le refroidissement au cours d'une traversée trop lente de cet intervalle de température ce phénomène, qui semble être associé à l'effet des impuretés, est moins sensible en présence de vanadium [10].

Par contre pour les aciers utilisés à l'état normalisé, le traitement thermique de relaxation une action à la fois sur les caractéristiques de traction (à l'ambiante ou à chaud) et sur la température de transition de résilience ; cette action est fonction de paramètre H du traitement. Ce comportement se produit par les aciers au C, au Mn, au C-Mn additionnés de Ni et pour les aciers a haut limite d'élasticité.

En ce qui concerne l'effet de traitement de relaxation sur les propriétés mécaniques du métal fondu, il est bénéfique en ce qui concerne la restauration à partir de l'état vieilli par l'effet tenso-thermique que l'on peut rencontrer dans les soudures multi passes surproduits épais. Il peut par contre avoir un effet fragilisant pour certaines compositions sensibles à la fragilité de revenu, essentiellement au cours d'un refroidissement trop lent ; la température maximale atteinte et la durée du séjour ne sont pas en cause dans ce phénomène [9].

En conclusion, il apparaît en toute état de cause, on doit, au moment du calcul d'une construction devant être soumise à un traitement thermique de relaxation, tenir compte des propriétés mécaniques réelles, telles qu'elles résultent de l'effet métallurgique de ce traitement.

Pour ce faire, la valeur H du paramètre de ce traitement doit être fixée au minimum compatible d'une part avec les conditions technologiques indiquées plus haut, d'autre part avec le taux de relaxation recherché ou imposé, cependant que la vitesse de refroidissement doit être réglée au maximum possible, tout en maintenant l'homogénéité thermique des pièces traitées [9].

d) Fissuration au réchauffage :

L'explication simplifiée du mécanisme de la relaxation qui a été donnée dans ce qui précède suppose un état de contraintes et un état structural homogènes. En réalité, un ensemble soudé, à l'état brut, n'est homogène à aucun de ces deux points de vue d'une part le joint soudé, et ses bords n'ont pas la même structure que le métal de base et réagissent donc différemment vis-à-vis du réchauffage nécessaire à la relaxation des contraintes, d'autre part, l'état de contrainte n'est pas uniforme, en raison de cette hétérogénéité de structure et aussi des particularités géométriques de la structure. Pour ces deux raisons on peut craindre que l'allongement plastique nécessaire à la relaxation soit mal supporté au niveau des soudures au cours du cycle de réchauffage, en raison de la structure initiale qui y règne et des modifications de ce cycle y engendre. Ce risque se trouve accentué au niveau des zones où se manifestent, Si tel est le cas, l'allongement plastique imposé risque de n'être obtenu qu'au risque de la fissuration qui a été appelée " Fissuration au réchauffage".

La fissuration au réchauffage peut affecter non seulement les ensembles soudés, mais aussi les pièces rechargées, en particuliers les parois intérieures d'appareils à pression revêtues d'une couche austénitique déposée par soudage sous flux en passe larges, surtout avec apport

en feuillards. Dans ce cas, la fissuration, qui est transversale, se produit dans l'étroite zone de revenu du métal de base comprise entre deux passes voisines, déjà signalée à propos des transformations en phase solide à l'échauffement.

Ce cas pose un problème supplémentaire associé à la différence de coefficient de dilatation entre le dépôt austénitique et le métal de base, qui intervient aussi bien durant le soudage qu'au cours du traitement thermique ultérieur.

Ce phénomène, qui ne se produit pas pour la plus part des aciers au C-Mn ou à haute limite d'élasticité à dispersoïde, est caractéristique de certains aciers alliés contenant des éléments d'addition carburigènes, c'est-à-dire susceptibles de produire des carbures, tels que, par exemple, les aciers au Cr-Mo-V. L'examen métallurgique des fissures montre qu'elles s'amorcent volontiers dans la zone affectée, au raccordement des cordons de soudure, où l'effet d'entaille accentue localement la contrainte résiduelle initiale et se propage le long des joints de grains de l'austénite mère, qui avait donné naissance au refroidissement après soudage à de la martensite ou de la bainite (Fig.II.6).

Ce parcours de la fissuration, qui a lieu à température croissante, s'explique par la précipitation des carbures dans les aciers grains d'austénite, d'où un durcissement qui entraîne la localisation de la déformation au niveau des joints de ces grains, affaiblis par la ségrégation des impuretés qui s'y produisent. Le risque de fissuration au réchauffage est donc essentiellement associé à la composition chimique de l'acier (éléments d'alliage et impuretés) et, d'autre part, aux conditions d'exécution de traitement.

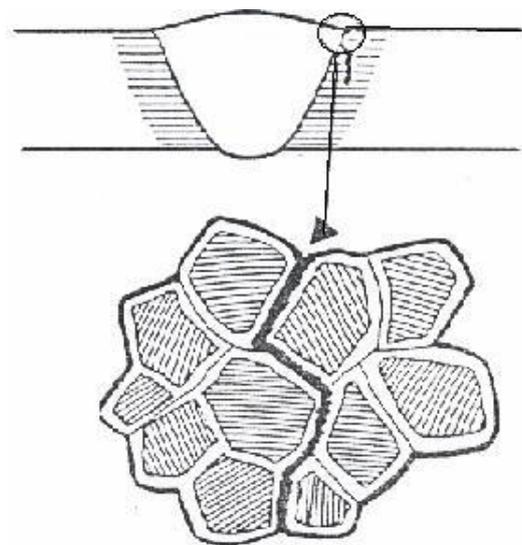


Fig. II.6 - Fissuration du joint de liaison (d'après [7])

e) **Traitement avant ou après refroidissement**

Normalement, il n'y a pas d'inconvénient à procéder au traitement de relaxation d'un ensemble soudé aussitôt après l'exécution de la dernière soudure, avant refroidissement complet, même si le programme prescrit un post-chauffage ; en effet, le traitement de relaxation se pratique à une température supérieure aux températures usuelles du post-chauffage, dont il ne peut que compléter les effets. Cependant, si on est en présence de plusieurs pièces identiques à souder et à traiter, on peut avoir intérêt à les stocker après refroidissement pour leur faire subir ultérieurement et simultanément le traitement thermique prescrit. Cependant, afin de fonctionner en toute sécurité, il faut veiller à ce que la température et le temps de post-chauffage permettent un refroidissement complet sans risque de fissuration à froid.

De même, lorsqu'une opération, de chauffage de longue durée doit être interrompue, par exemple aux fins de contrôle, la température de préchauffage doit être maintenue pendant un temps suffisant pour assurer un refroidissement sans risque, ou alors il faut procéder à un traitement intermédiaire de relaxation.

Une autre solution consiste à effectuer un test à chaud non destructif, mais cela indique des difficultés techniques importantes.

II.4.3.3. Recuit de normalisation :

En matière d'acier, le recuit ou la normalisation ont tous deux pour objet d'obtenir, au moyen d'un chauffage au-dessus de point A3 provoquant l'austénitisation complète de la zone ou de la pièce traitée, suivi d'un refroidissement relativement lent, une structure affinée constituée de ferrite et de perlite qui remplace, quelle qu'elle aient été, la constitution et la structure à l'état brut de soudage. La normalisation, qui comporte un refroidissement moins lent que le recuit, produit une perlite dont l'espace interlamellaire est plus faible, donc plus dure que ne le fait le recuit. Pour certains aciers faiblement alliés, la normalisation peut provoquer une trempe de type bainitique et requérir de ce fait un traitement ultérieur de revenu.

Du point de vue du mode de mise en œuvre, le traitement global simultané est le plus complet car il affecte tout l'ensemble traité, sans gradient de température ; il produit donc uniformément l'effet métallurgique recherché aussi bien dans la zone fondue et la zone

thermiquement affectée (ZAT) que dans le métal de base, qui bénéficie de la même régénération thermique, s'il a été déformé à froid ou à haute température (emboutissage à froid ou à chaud). S'il s'agit d'un ensemble important et lourd, le traitement global peut poser des problèmes pratiques difficiles de déformation ou d'encombrement. On Il peut être nécessaire de soutenir des pièces pour éviter toute déformation, et pour des pièces trop grandes pour être normalisées simultanément, telles que de longues viroles, on peut traiter successivement chaque moitié qu'on introduit dans le four cependant que l'autre dépasse à l'extérieur. On peut aussi normaliser séparément chaque élément de virole, dont la soudure longitudinale, placé verticalement dans le four bénéficie du traitement sans risque de déformation ; on assemble ensuite les viroles entre elle et en termine alors par un traitement de relaxation global, sans normalisation des soudures circulaires.

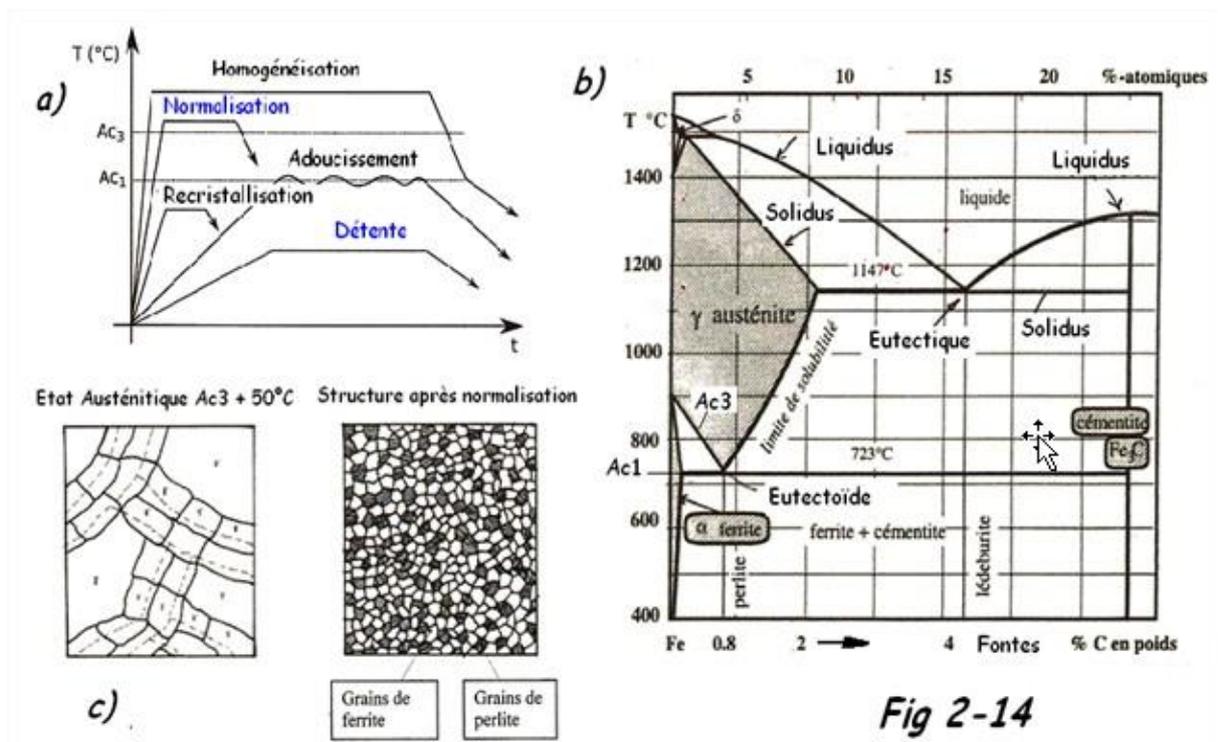


Figure II.7 : recuit de normalisation

II.4.3.4. Recuit de dégazage

Il permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques, augmente l'allongement et permet l'amélioration de la teneur en hydrogène (Fish-eyes). Pour effectuer ce recuit, on chauffe la pièce jusque 250 °C (suivant la qualité d'acier) et on maintient cette tempé.

- **Remarque générale :**

Tous ces traitements thermiques ne suppriment aucun défaut de soudage.

II.5. L'influence d'éléments d'addition sur la soudabilité :

La métallurgie actuelle fait de plus en plus appel à des aciers ayant des caractéristiques de plus en plus complexes. Si l'ajout de certains éléments confèrent à ces aciers des propriétés intéressantes, ceux-ci vont modifier les réactions au soudage. Quant aux impuretés, elles jouent toujours un rôle important sur les résultats mécaniques.

II.5.1. Le carbone

Il stabilise le fer (γ), c'est l'élément essentiel non métallique de tous les aciers. Il élargit fortement le domaine austénitique. Pour des raisons de corrosion chimique, la teneur en C est maintenue plus basse (inférieur à **0,6%**). Il améliore les caractéristiques mécaniques (Charge à la rupture, fluage et dureté). Son dosage est limité car il favorise le pouvoir trempant de l'acier et augmente le risque de fissuration lors du soudage.

II.5.2. Le manganèse

L'influence des éléments Mn et Si s'exerce d'une part sur la transformation de l'austénite au refroidissement, et d'autre part sur la résistance des constituants, de sorte que l'addition de ces éléments en quantité modérée permet, à résistance égale, d'abaisser la teneur en carbone. Mais l'influence du manganèse sur le pouvoir trempant de ces aciers se manifeste aussi lors de leur soudage, ce qui a motivé le coefficient attribué à cet élément dans la formulation du carbone équivalent.

INFLUENCE DU MANGANÈSE SUR LA SOUDABILITÉ

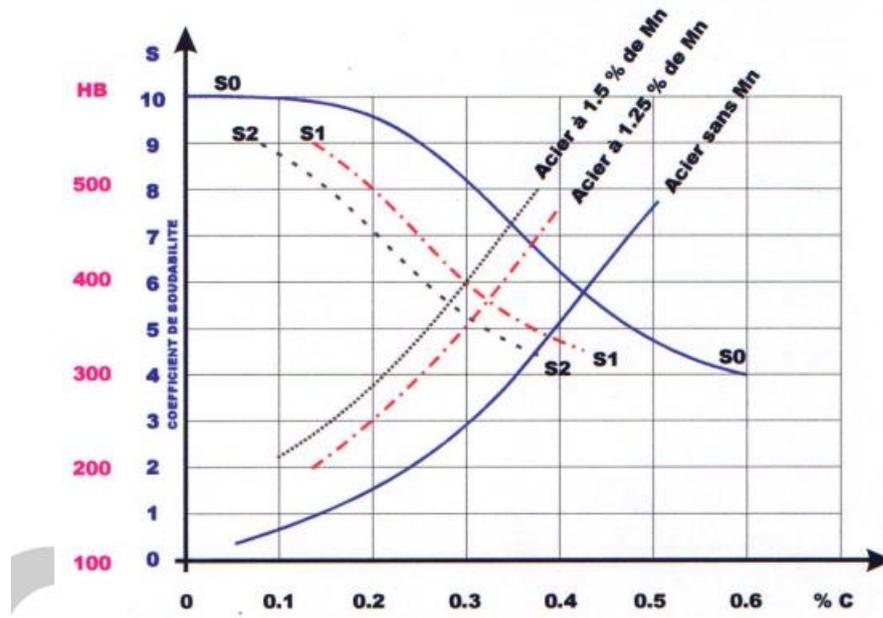


Figure II.8. Influence du manganèse sur la soudabilité

La figure II.8. Met en évidence l'influence du manganèse sur la soudabilité, ainsi un acier à 0,2 % de C + 1,5 % de manganèse à une soudabilité analogue à un acier à 0,35 % de carbone.

II.5.3. Influence du chrome (Cr) :

L'avantage principal de l'ajout du Chrome aux aciers est l'amélioration de la résistance à la corrosion. La résistance est d'autant plus grande que la teneur en Chrome est élevée. La résistance à la corrosion est due à la formation d'un film passif riche en Chrome à la surface de l'acier. D'un point de vue électrochimique ceci se traduit par l'extension du domaine passif et la réduction de la vitesse de corrosion. Cependant, l'ajout du Chrome aux aciers inoxydables est limité à cause du risque de précipitation des carbures de Chrome et des phases intermétalliques (**Figure II.9**). Ces phases provoquent souvent la réduction de la ductilité, la ténacité et la résistance à la corrosion. Aussi, le Chrome est un élément alpha gènes qui stabilise la ferrite.

Elément trempant très actif augmente la résistance à la rupture. A des teneurs supérieures à 1%, associé au carbone le soudage devient très délicat, il se forme des carbures de chrome au niveau des joints.

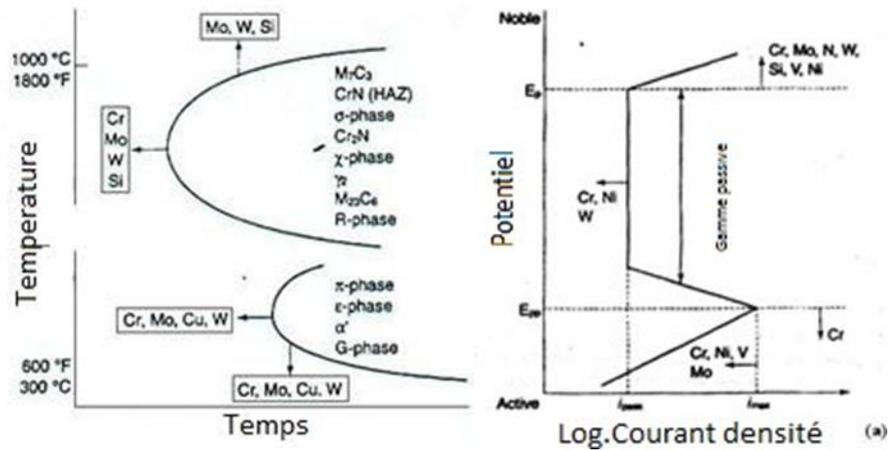


Figure II.9 : (a) Effet des éléments d'alliage sur la courbe de polarisation anodique ;
 (b) Effet des éléments d'alliage sur la formation des différents précipités. [11, 12]

II.5.4. Influence du Nickel (Ni) :

Améliore les propriétés de l'acier, il est utilisé dans les aciers travaillant à basse température et dans les aciers inoxydables.

Élément stabilisateur de l'austénite. Il élargit le domaine d'existence de l'austénite en fonction de sa teneur jusqu'aux températures inférieures à 20°C (figure II.10). Il améliore la ductilité de l'acier et favorise la mise en œuvre par déformation plastique, Le Ni constitue avec le chrome l'élément d'alliage essentiel des aciers inoxydables, il améliore la résistance à la corrosion et renforce en particulier la résistance à la corrosion sous contraintes. Bien que le nickel n'améliore pas d'une façon significative le niveau de dureté, mais allié au chrome et au molybdène il permet d'homogénéiser la structure et améliore la tenue en service dans des conditions d'usure sévères

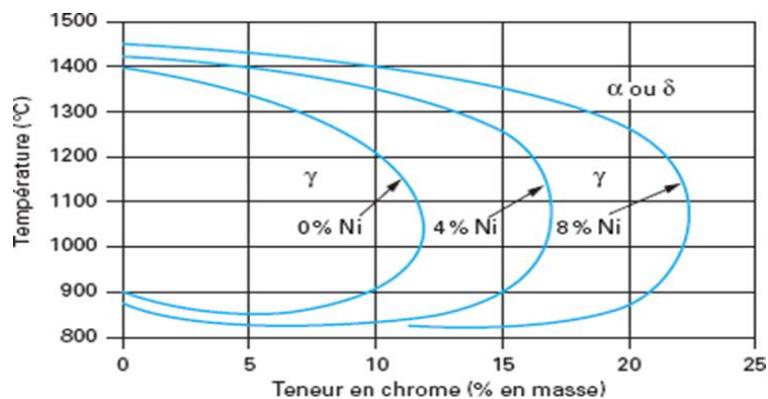


Figure II.10 : Influence du Nickel sur diagramme ternaire Fe-Cr-Ni [13].

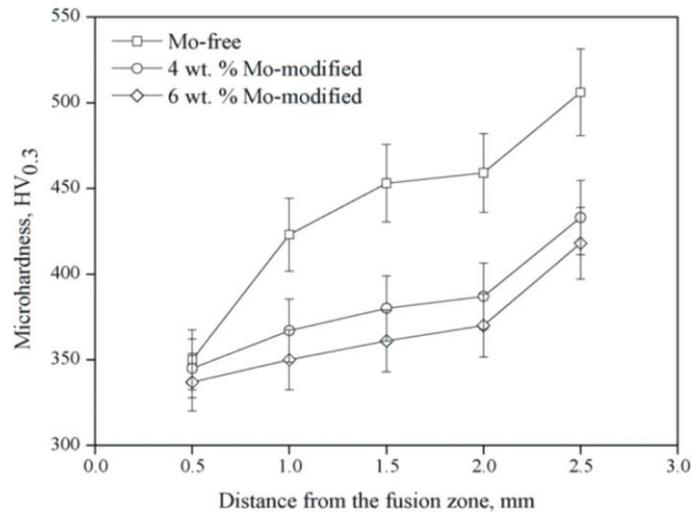


Figure II.11 : Micro dureté d'alliage de rechargement dur à base de nickel [14].

II.5.5. Le molybdène

Très actif au point de vue trempe, élément noble. Dans les aciers de construction, la teneur est en générale de 0,5 à 1%, dans ce cas, il augmente la résistance à chaud (fluage) et diminue les risques de fragilité. Il améliore la résistance à la corrosion dans les aciers inoxydables (ex. tuyauterie véhiculant de l'UREE dans l'industrie chimique).

II.5.6. Cuivre (Cu) :

Toujours à faible teneur (0,5%), il améliore la résistance à la corrosion surtout dans le milieu marin, on le trouve dans certains aciers inoxydables ou des aciers à haute limite élastique.

II.5.7. Aluminium (Al) :

Affine le grain, il est retenu dans la composition du métal d'apport pour le soudage oxy-acétylénique des aciers. C'est un désoxydant efficace.

CHAPITRE III :

LE SOUDAGE

CHAPITRE III : LE SOUDAGE

III.1. Théorie du soudage :

Le soudage est un procédé d'assemblage permettant de réaliser des joints métalliques soudés grâce à des températures élevées, à de fortes pressions ou aux deux. Dans ce chapitre, on abordera uniquement les procédés développant une chaleur intense sur les surfaces à assembler afin d'engendrer une fusion locale. Un métal d'apport est en général ajouté dans le bain de fusion permettant ainsi de relier les deux surfaces à assembler et former ainsi un joint soudé de dimensions et de formes voulues après refroidissement. Le procédé le plus couramment utilisé en construction métallique utilise un arc électrique développant une chaleur intense, entretenu entre l'extrémité du fil d'apport et les pièces à assembler.

Quand le métal fondu situé dans le bain de fusion n'est pas protégé, il peut absorber directement l'oxygène et l'azote contenus dans l'air. Cette absorption peut conduire à l'apparition de porosités et à une fragilité de ce métal après solidification. Les techniques utilisées pour éviter l'absorption de gaz par la soudure dépend des procédés de soudage. Les procédés de soudage les plus utilisés en construction métallique seront revus en détail ci-après.

III.1.1. Le soudage de nos jours :

Nous n'estimons aujourd'hui que (60 à 80) % de la production mondiale de l'acier soient destinés à la fabrication des produits soudés.

A noter que le soudage est utilisé notamment dans les domaines de la fabrication d'assemblages métalliques allant de la microélectronique à la fabrication de grands corps de presses hydrauliques. Actuellement nous avons la possibilité de des éléments d'épaisseur de 0.01mm jusqu'à 1000 mm et même plus en bref, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés dans les techniques modernes.

Les procédés de soudage appelés soudage de rechargement existent aussi et sont largement utilisés pour la remise en état de pièces et assemblage usés ou endommagés.

Le développement actuel des procédés de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipement), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie telle que le LASER [15].

III.1.2. Définition du soudage

Dans sa définition la plus générale, le soudage consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, en assurant la continuité de la matière des parties assemblées soit par chauffage, soit par pression, soit par combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un matériau d'apport. L'utilisation d'un métal d'apport répond à deux besoins : il permet d'une part de combler le jeu entre les pièces assemblées, et d'autre part de changer la composition chimique et la structure cristalline de la zone fondue afin d'obtenir les performances recherchées. De manière générale, le terme « soudage » désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation d'un assemblage, et celui de « soudure » désigne le joint formé (figure III.1).

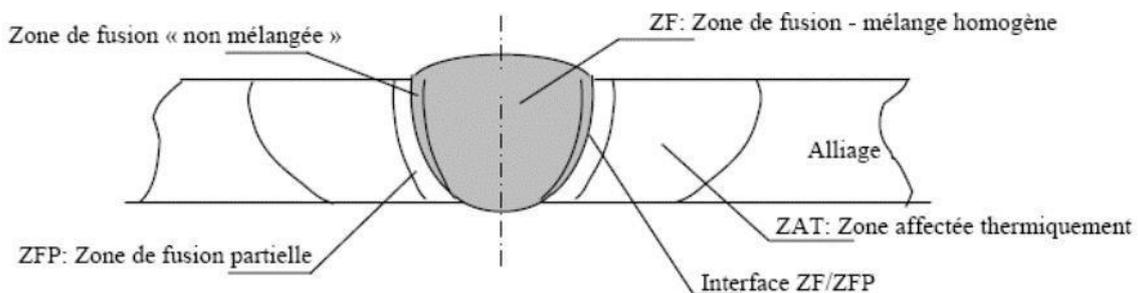


Figure III.1 : Les zones de soudage [16].

III.1.3. Caractéristique de soudage

a) Métal de base (MB) :

Cette partie de la structure soudée est suffisamment loin de la source de chaleur pour qu'il n'y ait pas eu de transformation métallurgique significative lors de l'opération de soudage. 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 [19].

b) Zone affectée thermiquement (ZAT) :

La zone affectée thermiquement est la portion du métal de base immédiatement voisine de la zone de liaison ; c'est une région qui subit des transformations dues au soudage [19].

c) La zone de fusion (ZF) mélange homogène :

Cette zone est la région chauffée au-dessus de la température du liquidus. La structure du métal de base initial 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 [19].

d) La zone de fusion (ZF) 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 [19].

e) 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'élément d'alliages aux joints de grains, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zoner de fusion partielle [19].

III.2. La métallurgie du soudage :

III.2.1. Le diagramme de Schaeffler :

La composition chimique d'un cordon de soudure dépend des compositions chimiques des métaux d'apport et des métaux de base, ainsi que de la proportion de chacun de ces métaux.

La structure cristalline dépend de la forme des cristaux dans le cordon de soudure, des conditions de refroidissement, d'un traitement thermique éventuel après soudage.

Le diagramme de Schaeffler permet de choisir un métal d'apport et de garantir de bonnes qualités métallurgiques. Le diagramme de Schaeffler permet aussi de prévoir les risques métallurgiques pour l'assemblage soudé.

Il est présenté avec en abscisses l'équivalent Chrome (EqCr), et en ordonnées l'équivalent Nickel (EqNi).

Le diagramme de Schaeffer est divisé en 4 zones qui représente les différentes structures rencontrées pour le soudage des aciers inoxydables. Ces différentes structures sont :

- La martensite (M)
- L'austénite (A)
- La ferrite (F)
- L'austéno-ferrite (A+F)

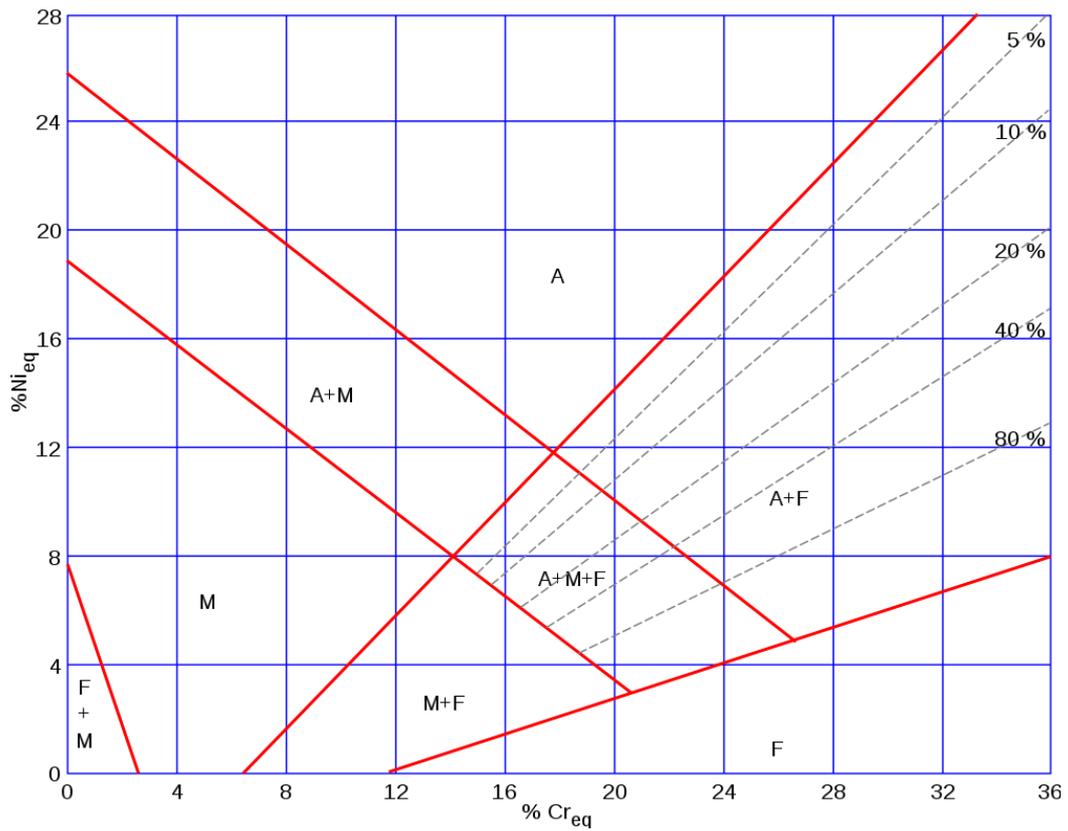


Figure III.2 le diagramme de schaeffler.

- **Les zones à risque sur le diagramme de schaeffler**

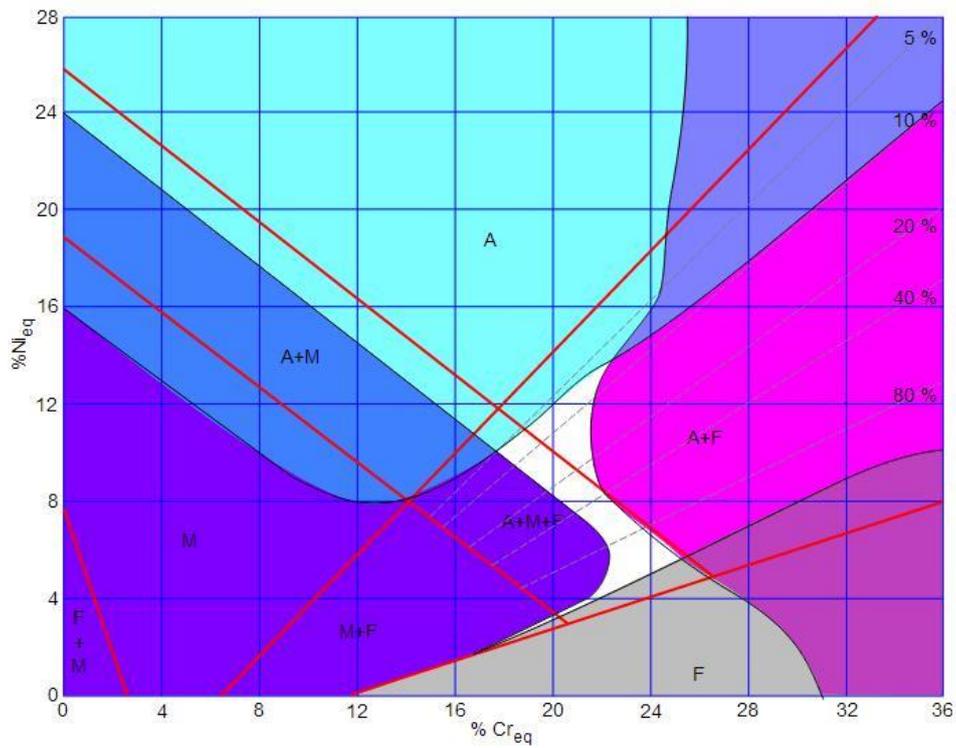


Figure III.3 les zones à risque sur le diagramme de schaeffler

Légende :

- A : austénite ;
- F : ferrite ;
- M : martensite ;
- 5-80% : pourcentage en masse de la ferrite dans l'austénite

Zones de risques :

- Bleu clair : fissuration à chaud,
- Violet : fissuration à froid,
- Rose : fragilisation par transformation,
- Gris : fragilisation par croissance des grains,
- Blanc : zone idéale.

III.2.2. Aspects métallurgiques de la zone soudée

Les caractéristiques d'un acier sont fonction de sa nature et de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition chimique et au traitement thermique que subit l'acier.

Les principes généraux de la métallurgie (édifice cristallin, composition chimique, transformation d'état de structure, modifications chimiques), s'appliquent aux caractéristiques mécaniques et chimiques, de la zone fondue des soudures.

L'examen métallographique de la soudure fait apparaître une grande diversité de structures. On observe pour chaque joint soudé divers aspects qui rendent compte de la variation du cycle thermique subi en chaque point examiné. La température et le temps de chauffage ainsi que les vitesses de refroidissement produisent des modifications qui affectent la dimension des grains et les phases en présence.

Parce que le bain de fusion a un volume relativement restreint, son refroidissement est rapide et les cristaux qui se solidifient sont orientés dans la direction du gradient de température. Leur dimension dépend de la température et de la cinétique de refroidissement. La figure III.4 donne une représentation schématique d'un joint soudé perpendiculairement à la ligne de fusion [20].

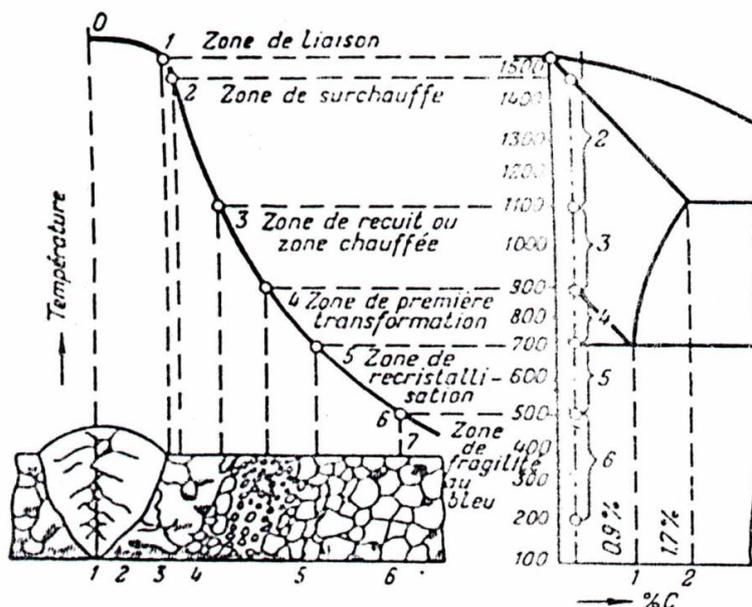


Fig. Transformations de l'acier dans la zone réchauffée

Figure III.4 – Représentation schématique d'un joint soudé

On distingue plusieurs zones : figure III.5 [21].

III.2.2.1. Zone de fusion (structure basaltique) :

Qui pour une soudure multi passes est constituée par une alternance de zones thermiquement régénérés et de zones brutes de solidification à grains orientés.

III.2.2.2. Zone surchauffée :

A granulation grossière où la température maximale atteinte est très élevée (entre 1200 et 1500). Le refroidissement rapide de l'austénite surchauffée, dont le grain atteint des dimensions importantes, donne la structure de Widmannstaetten, structure très fragile. Dans ce cas, la ferrite ou la cémentite pro-eutectoïde précipite isolément au cours de leur migration en direction des joints des grains d'austénite. Leur précipitation s'effectue alors le long des plans de clivage du cristal d'austénite où elle se trouve facilitée. Le constituant pro-eutectoïde précipite le long de ces plans sous forme de plages de grandes dimensions. La section de celle-ci par le plan duquel s'effectue l'observation du métal au microscope donne lieu à l'apparition d'aiguilles plus ou moins allongées, orientées dans des directions déterminées (figure III.6). Les structures de Widmannstaetten doivent être effacées par un traitement de normalisation, car sinon elles sont la source de la plupart des problèmes soulevés par le soudage des aciers.

III.2.2.3. Zone de normalisation :

Où la granulation est plus fine que dans le métal de base. La température atteinte est légèrement supérieure à Ac_3 .

III.2.2.4. Zone à température maximale comprise entre Ac_1 et Ac_3 :

C'est une zone de transformations incomplètes. L'austénite résiduelle se transforme en perlite fine, et les grains de ferrite pro-eutectoïde ne se modifient pas. La granulation dans cette zone n'est pas très homogène. L'austénitisation partielle du métal conduit pour cet acier à une structure à grains très fins.

III.2.2.5. Zone de recristallisation :

Où la température maximale atteinte est comprise entre 500 et Ac_1 . Certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu dans cette zone : précipitations et coalescence en présence d'éléments dispersifs, sur revenu dans certains aciers trempés revenus, légère globularisation de la perlite dans les aciers normalisés.

III.2.2.6. Métal de base :

Où la température maximale atteinte resta inférieure à environ 500°C, dans laquelle on ne détectera pas de modifications structurales visibles.

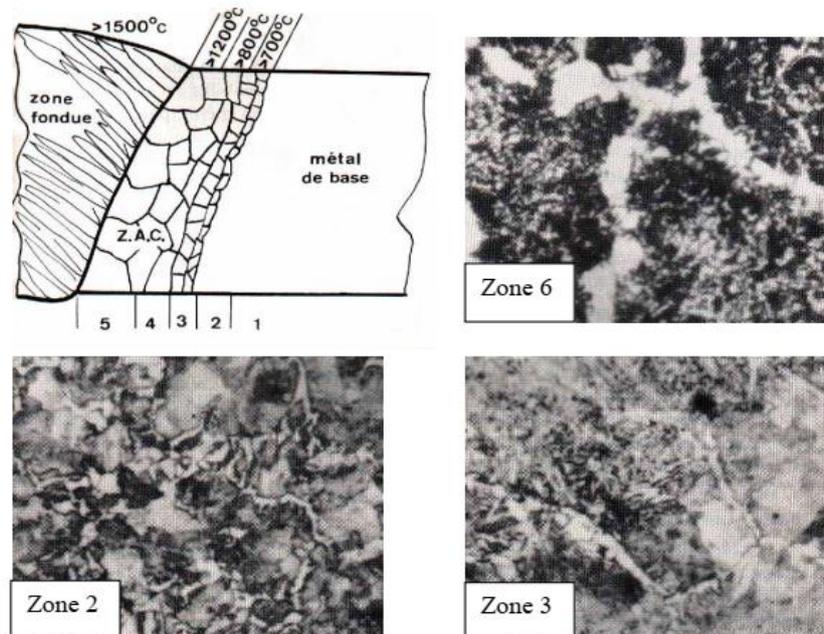


Figure III.5. - Transformations structurales dans la ZAT : représentation schématique et micrographies. Dans la Zone1 : $\theta < 600^\circ$ et dans la Zone3 : $Ac_3 > \theta > Ac_1$ et dans la (zone de liaison) Zone2 : $\theta > 1200^\circ$ structure à gros grains



Figure III.6 - structure de weidmannstaten

III.2.3. Cycle thermique de soudage

Il est divisé en deux périodes :

a) Chauffage - b) Refroidissement

a) Période de chauffage

Elle est caractérisée par la vitesse de chauffage (V_c) et par la température maximale atteinte (θ_m).

L'importance de la zone affectée par la température est fonction pour un matériau et une pièce donnés de l'énergie de soudage et de la température initiale (T_0) des pièces les phénomènes suivant apparaissent :

- Austénitisation ;
- Recristallisation ;
- Grossissement du grain ;
- Dissolution des carbures.

b) Période de refroidissement

Elle est caractérisée par la vitesse de refroidissement V_r ou le temps de refroidissement entre 850°C et 550°C (tr 850 / 550).

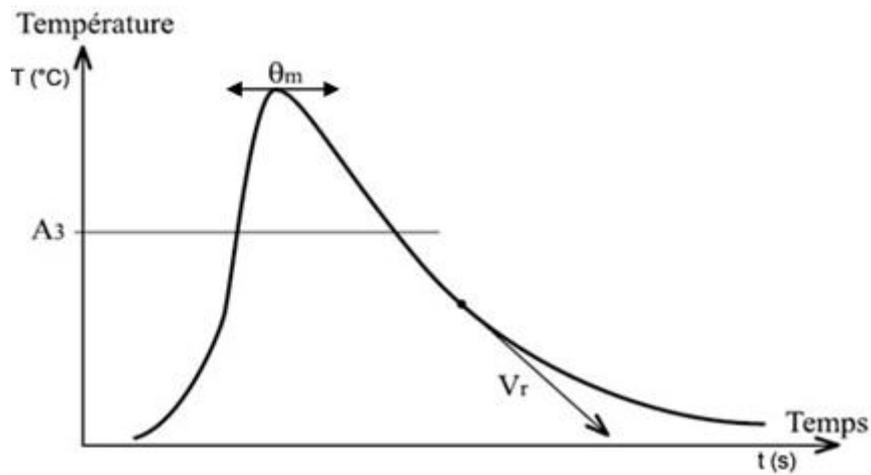


Figure III.7 : Cycle thermique de soudage

III.3. La technologie du soudage :

III.3.1. Principaux procédés de soudage

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenus par diffusion, déformation, ... Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie .

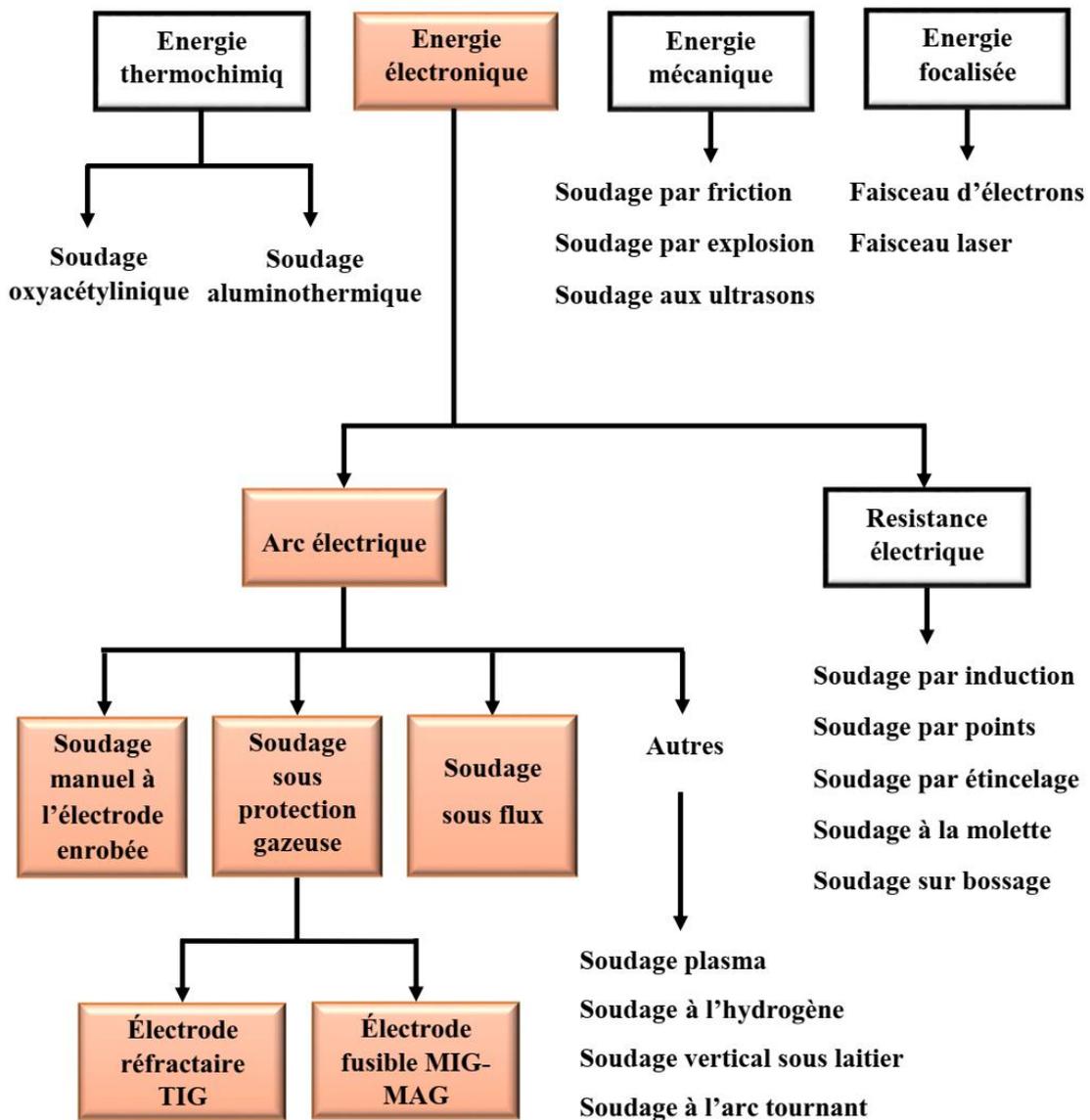


Figure III.8 : Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie.

III.3.2. Soudage à l'arc submergé (SAW)

Le soudage électrique à l'arc submergé (submerged arc welding), plus communément appelé soudage sous flux en poudre est un procédé de soudage automatique découvert aux USA en 1935 par KENNEDY.

Ce procédé, principalement utilisé en soudage à plat, trouve depuis 1950 des applications en corniche et en vertical sous laitier.

On distingue les procédés monofil, bifils et multifils qui nécessitent la mise en œuvre d'un ou plusieurs fils.

Le soudage à l'arc sous flux en poudre constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe en effet un fil électrode fusible, dévidé d'une bobine, avec une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues. Le procédé est représenté sur la figure III.9 et qui comporte :

- une tête de soudage regroupant la torche proprement dite, l'entraîneur de fil, le dévidoir recevant la bobine de fil, la trémie de poudre et son conduit à la torche ;
- une source de courant continu ou, dans certains cas, alternatif ;
- un coffret d'automatisme et des accessoires.

L'opération de soudage comprend les différentes phases :

- mise en place des pièces et maintien de celles-ci dans leur position relative ;
- mise en position de la tête sur le point de départ de la soudure, l'électrode émergeant du tube contact.
- appui sur le bouton de commande, ce qui déclenche le cycle proprement dit, à savoir
- ouverture de la trappe de la trémie de flux, lequel se répand dans la zone d'arc,
- mise sous tension du générateur en apparition de la tension à vide,
- avance du fil par mise et marche de l'entraîneur ; l'arc s'amorce au contact électrode-pièce et la fusion ainsi que le dépôt de métal s'installent instantanément ;
- commande du déplacement relatif tête-pièce pour former le cordon de soudure.

Le flux en poudre et le fil continuent à être alimenté d'une façon régulière et l'arc s'établit sous la poudre, dans les vapeurs et sous le laitier liquide qu'il y crée, qui constituent ainsi la protection du métal en fusion. Le comportement particulier du flux, qui le distingue de l'enrobage, réalise un certain confinement de l'arc.

L'amenée du courant à l'extrémité de l'électrode permet également de travailler à des densités de courant plus élevées que ne l'autorisent les électrodes enrobées et permet par suite d'obtenir des pénétrations, des taux de dépôts et des dilutions plus importantes (jusqu'à 70 %). Le transfert de métal s'effectue essentiellement par pulvérisation.

Après soudure, le cordon est recouvert du laitier solide refroidi (figure III.9), qu'il est nécessaire d'enlever par piquage.

La consommation en poids de poudre est en pratique du même ordre que celle du fil lui-même. Pendant le soudage, le flux s'appauvrit en éléments essentiels et doit être retraité avant réutilisation [16].

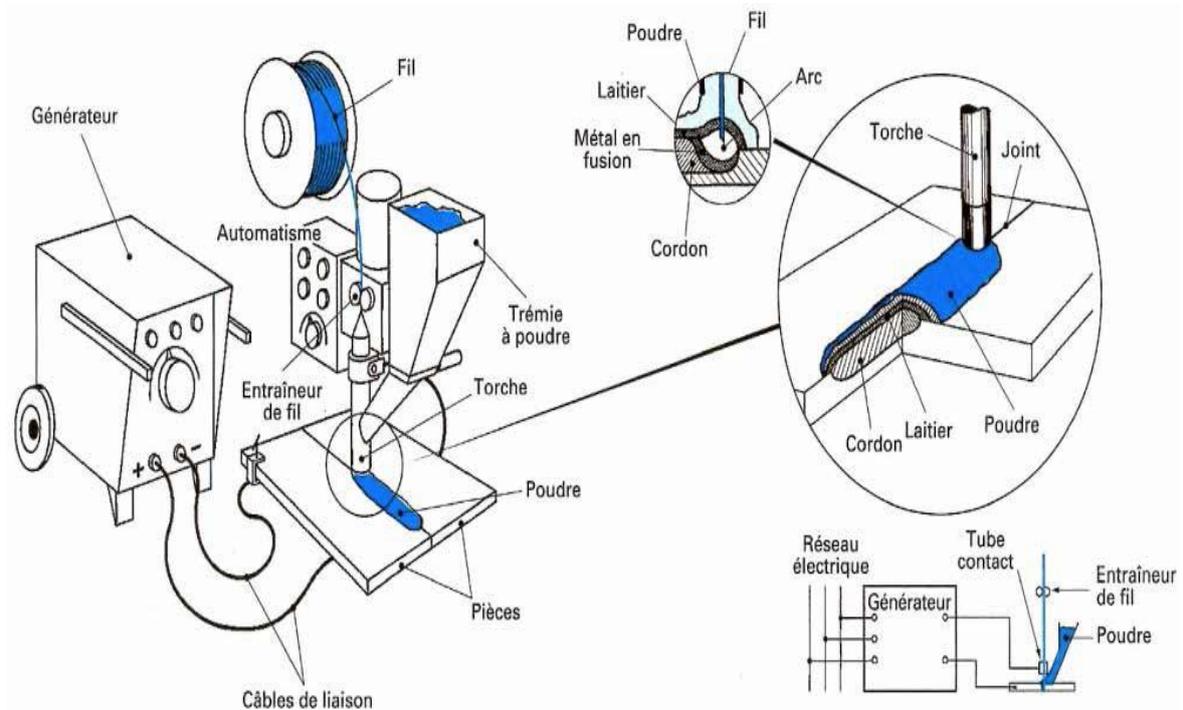


Figure III.9 : Soudage sous flux en poudre [22]

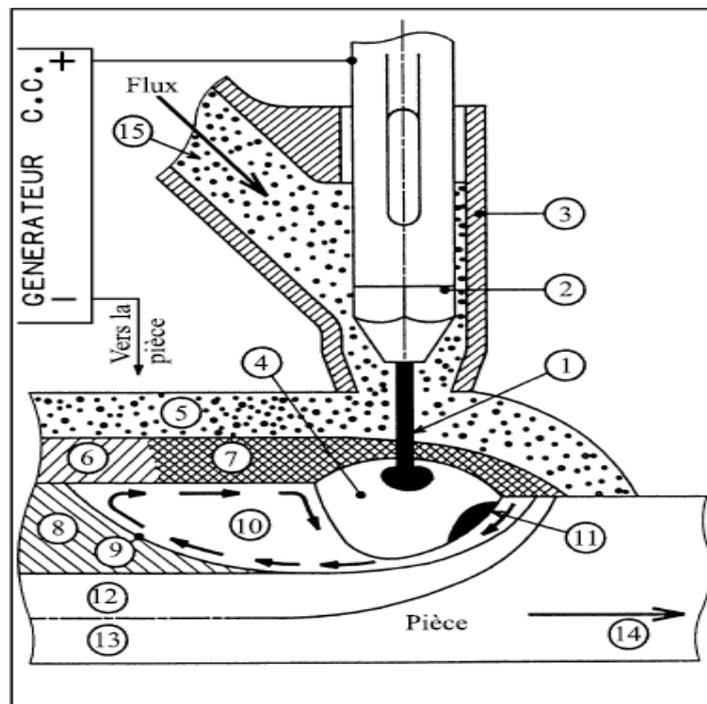


Figure III.10 : Principe du procédé de soudage sous flux en poudre

- 1- Fil électrode.
- 2- Tube contact relié en général au pôle + du générateur.
- 3- Buse qui canalise l'arrivée du flux.
- 4- Arc électrique non visible.
- 5- Flux non fondu, récupérable.
- 6- Laitier solidifié.
- 7- Laitier en fusion.
- 8- Métal déposé solidifié.
- 9- Front de solidification.
- 10- Métal en fusion ou bain de fusion.
- 11- Goutte de métal détachée.
- 12- Zone affectée par la chaleur.
- 13- Métal de base non affecté par la chaleur.
- 14- Sens de soudage.
- 15- arrivée de flux.

III.3.2.1. Flux et matériau d'apport

Le fil d'apport et la composition des flux déterminent la qualité de soudure obtenue. L'objectif est d'obtenir un métal soudé dont la composition et la résistance sont identiques à celles du matériau de base. La composition du métal soudé dépend de celle du fil d'apport, qu'il faut donc choisir en conséquence en tenant compte de la possibilité de perte d'éléments d'alliage brûlés par l'arc, de fusion du métal de base et de production d'alliage sous l'effet du flux.

L'utilisation de flux à haute capacité dans le soudage à multi-passes peut conduire à une accumulation d'éléments d'alliage d'un passe à l'autre.

1. Flux

Le flux en poudre crée le milieu ionisé (ou conducteur) et protège la soudure. De plus, comme l'enrobage, il partage avec le fil la responsabilité des caractéristiques des soudures. Il est obtenu également à partir de divers oxydes minéraux et conditionné en mélanges poudreux selon essentiellement trois méthodes.

- **Flux fondus (F)**

Ils sont obtenus par fusion dans un four à haute température (1300 à 1400 °C) des divers constituants soigneusement dosés. La pâte refroidie et homogène est ensuite broyée et tamisée pour obtenir la granulométrie souhaitée.

Les principales caractéristiques des flux fondus sont une faible hygroscopicité, sa stabilité à des courants élevés et leur homogénéité. Ils ont, par suite de leur élaboration, une faible activité dans le processus de soudage.

- **Flux agglomérés (B)**

Ils sont des mélange de divers composants, agglomérés ensuite par un liant soit à froid, soit à chaud mais toujours à basse température. On évite ainsi la décomposition des éléments ou leur interaction et cela permet d'introduire des éléments (alliages ou désoxydants) actifs. Plus sensibles à l'humidité, les flux agglomérés doivent être soigneusement séchés avant emploi et leur mise en œuvre est plus fragile. Leur caractère désoxydant est un avantage.

- **Flux mixtes (M)**

Ils sont des mélanges des deux types cités ci-dessus.

1.2.Rôles des flux en poudre :

- **Rôle électrique**

Isolants à froid, les flux deviennent conducteurs à chaud et participent de ce fait à la fusion du métal déposé.

- **Rôle physique**

Le flux transformé en laitier liquide pendant le soudage maintient et moule le métal déposé. De là, les effets du flux sur l'aspect du cordon, sa forme, son profil et ses raccordements avec les bords soudés, ainsi que celui très important sur la compacité du métal déposé du fait du dégazage en cours de soudage

- **Rôle métallurgique**

- Le flux protège le bain de fusion contre l'action de l'oxygène et de l'azote atmosphérique.
- Il participe à la scorification de l'oxyde de fer existant sur les bords à souder.
- Affine le métal en fusion par l'action de ses éléments calmants. (Manganèse, silicium.)

- Incorpore en faible quantité des éléments d'alliage tels que chrome, nickel, etc.
- Assure un refroidissement lent du bain.

1.3. Caractères des flux :

Selon la composition, on distingue des flux actifs et des flux non actifs. Un flux est dit actif lorsqu'il est à l'origine des teneurs en manganèse et en silicium du métal déposé.

On distingue également, pour un flux déterminé, son caractère acide, basique ou neutre.

- **Flux acides**

Ils ont un pourcentage élevé de silice (SiO_2), le laitier est dense et visqueux, les cordons ont un bel aspect. Le métal déposé a une bonne résistance à la fissuration mais des résiliences moyennes.

- **Flux basiques**

Les flux basiques, à faible pourcentage de silice, sont généralement riches en CaO , MgO , BaO , et fournissent un laitier fluide. L'aspect des soudures est moins régulier. L'action métallurgique est excellente et donne lieu à d'excellentes résiliences. Ils ne supportent pas les fortes intensités.

- **Flux neutres**

Les flux neutres allient les propriétés des deux précédents.

2. Fil d'apport [22]

Le matériau du fil de soudage correspond au métal de base de la pièce et est défini en fonction des caractéristiques du métal déposé. Les fils sont ainsi classés selon leur composition métallurgique et leurs conditions d'emploi.

Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique qui facilite l'arrivée du courant et reste sans effet sur le métal déposé.

Les fils sont bobinés en tourets et livrés tels quels pour leur utilisation immédiate après mise en place sur les dévideurs.

Les diamètres de fils utilisés en soudage sous flux sont normalisés : 1,2 ; 1,6 ; 2 ; 2,4 ; 3,2 ; 4 ; 4,8 ; 5 et 5,55 mm.

- **Intensité moyenne (Is) :**

On peut calculer les valeurs moyennes approximatives de l'intensité de soudage que peut supporter le fil électrode à l'aide des formules suivantes :

- Limite inférieure = \varnothing du fil (mm) * 100
- Limite supérieures = \varnothing du fil (mm) * 200

- **Tension de soudage (Us) :**

Il est possible de déterminer la tension de soudage d'après la formule :

$$U_2 = 20 \text{ volts} + 0,02 * I_2$$

2.1. Courbes de fusion

Les courbes de fusion permettent de déterminer la vitesse de fusion du fil en fonction de l'intensité de soudage.

La vitesse de fusion est, principalement en fonction de :

- De diamètre du fil électrode.
- De la nature du courant de soudage (continu ou alternatif).
- De l'intensité appliquée.
- De la longueur de la partie terminale.
- De la polarité adoptée en courant continu (+ ou - au fil électrode).
- De la nature du fil électrode (acier ou inox).
- De type de flux en poudre utilisé ;

Remarque :

La vitesse de fusion d'un fil inox est différente d'un fil en acier.

III.3.3. Influence des paramètres en soudage à l'arc submergé

La géométrie du cordon peut évoluer sous l'influence des principaux facteurs ci-après :

- Intensité de soudage (Is) ;
- Tension de soudage (Us) ;
- Vitesse de soudage (Vs) ;
- Densité de courant (d) ;
- Diamètre du fil électrode (\varnothing) ;

- Nature du courant et polarité ;
- Longueur libre de fil électrode ;
- Position du fil et inclinaison par rapport à la surface de la tôle ;
- Position de la prise de masse.

a) Influence de l'intensité (I_s)

L'intensité influence la profondeur de pénétration, la hauteur du cordon, la quantité de métal déposé et parfois les pertes en éléments d'alliage. La figure ci-dessous illustre l'influence de l'intensité sur la pénétration et la surépaisseur d'un cordon.

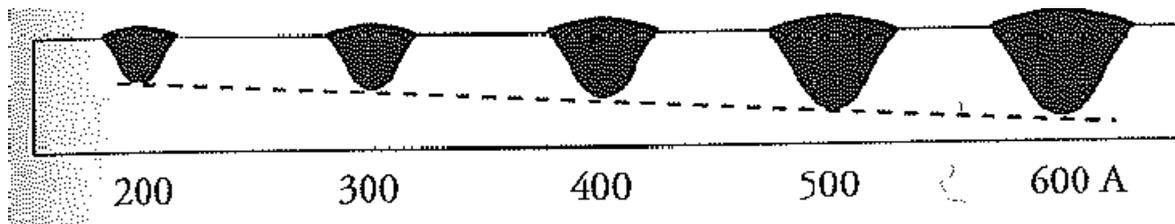


Figure III.11 : Effet du courant de soudage sur l'aspect de la soudure.

• Courbes de fusion :

Les courbes de fusion des fils électrode précisent la relation entre l'intensité de soudage et la vitesse de dévidage du fil pour différents diamètres.

On constate qu'une augmentation de l'intensité provoque :

- Une vitesse de dévidage plus rapide.
- Une quantité de métal déposé plus importante.

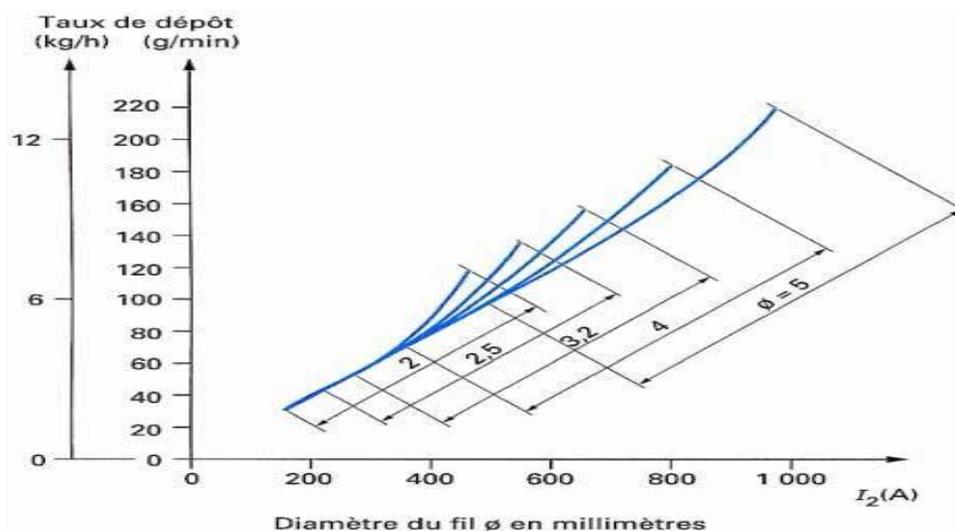


Figure III.12 : Taux de dépôt moyen en soudage sous flux [22]

En moyenne, la vitesse de dépôt croît d'environ 1.5 kg/heure par tranche d'augmentation d'intensité de 100 ampères.

- **Influence de l'intensité (I_s) sur les pertes en éléments d'alliage**

L'influence de l'intensité sur les pertes en éléments d'alliage (manganèse et silicium) est déterminée par la composition chimique du fil électrode et du flux.

- b) Influence de la tension de soudage (U_s)**

Une tension d'arc élevée donne une soudure large et peu pénétrante, qui convient au soudage de bords très écartés et permet l'incorporation d'un plus grand nombre d'éléments d'alliage au flux. Mais une tension d'arc élevée augmente aussi la consommation de flux et complique l'élimination du laitier refroidi en même temps. Elle accroît le risque de formation de caniveaux, notamment lors de la réalisation de soudures d'angle. A l'inverse une faible tension d'arc donne à la soudure une convexité excessive ainsi qu'un mauvais angle de contact avec la pièce à souder.

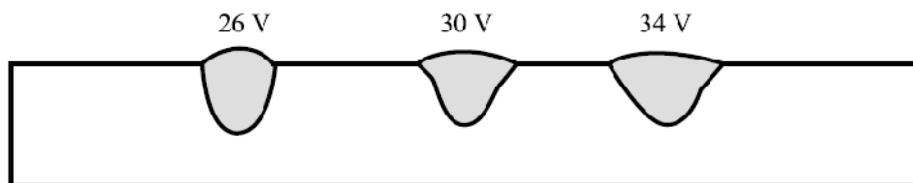


Figure III.13 : Effet de la tension d'arc sur l'aspect de la soudure

- **Influence de la tension de soudage sur les pertes en éléments d'alliage :**

La tension doit être ajustée suivant les recommandations du fabricant de flux. La géométrie d'un cordon correspond pour un flux donné au rapport Intensité/tension de soudage.

La consommation de flux s'accroît avec la tension d'arc croissante, tandis que la variation de cette dernière peut influencer les transferts d'éléments d'alliage entre métal déposé et flux.

- c) Influence de la vitesse de soudage (V_s)**

La vitesse influence sur la pénétration et la géométrie du cordon.

A tension et intensité de soudage constantes, l'accroissement de la vitesse a pour effet d'affiner le cordon.

La profondeur de pénétration diminue avec la vitesse de soudage.

Un accroissement de la vitesse de soudage peut provoquer l'apparition de porosités du fait de la solidification rapide du bain de fusion entraînant un dégazage insuffisant.

Un soudage trop rapide peut également provoquer l'apparition de caniveaux.

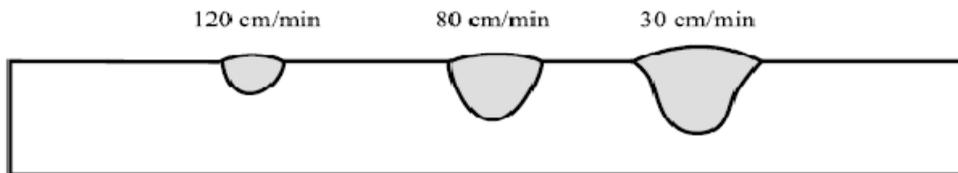


Figure III.14. Influence de la vitesse de soudage sur la forme du cordon

d) Influence de la polarité

On pratique habituellement le soudage sous flux en poudre avec le fil électrode relié au pôle positif, polarité qui conduit à une pénétration plus forte avec la plupart des flux.

Par contre, la vitesse de dépôt est plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive. Toutefois des défauts de liaison peuvent apparaître en soudage avec une polarité négative car la pénétration est réduite.

CHAPITRE VI :
ANALYSE
BIBLIOGRAPHIQUE D'UN
ARTICLE ANTERIENR

CHAPITRE IV : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE D'UN ARTICLE ANTERIEUR

IV.1. Effets de la couche de soudure sur la microstructure de rechargement dur en carbure de tungstène :

Le carbure de tungstène (WC) est élargi comme matériau de rechargement dur en raison de sa dureté élevée, de sa conductivité thermique élevée et de sa bonne mouillabilité [23, 24].

Comme les caractéristiques microstructurales, en particulier la distribution du carbure, influencent la résistance à l'usure du revêtement de rechargement dur.

On a étudié l'influence du nombre de couches de soudure sur la répartition du carbure dans le revêtement ainsi que ses valeurs de dureté afin d'améliorer la résistance à l'utilisation du revêtement à revêtement dur.

IV.1.2. Les conditions et les méthodes expérimentales utilisées :

IV.1.2.1. Préparation des échantillons

IV.1.2.1.1. Lame et électrode

La figure IV.1 illustre la lame en acier au carbone BS3100 de qualité A3 qui agit comme métal de base dans le processus de rechargement dur. Le pourcentage de carbone dans la lame détermine la qualité de la lame. Le carbone (C) et le manganèse (Mn) sont les principaux éléments de l'acier au carbone. Pendant ce temps, d'autres éléments mineurs sont également présents comme indiqué dans le tableau IV.1. L'électrode (WC) enfermée dans de l'acier doux tubulaire est utilisée comme électrode de rechargement dur. L'électrode a un diamètre d'environ 6 mm et une longueur de 350 mm. Le tableau IV.2 présente la composition chimique de l'électrode.

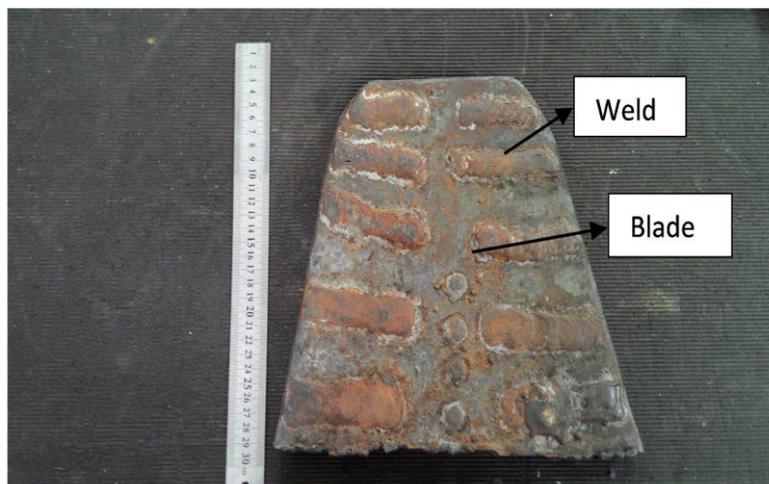


Figure IV.1. Lame en acier au carbone à revêtement dur.

Elément	C	Mn	Si	S	Mo	P	Ni	Cr	Fe
Composition (%)	0.32	0.74	0.25	0.01	0.02	0.02	0.17	0.29	balance

Tableau IV.1. Composition élémentaire de l'acier au carbone BS3100.

Elément	C	Si	Mn	W	Fe
Composition (%)	3.1	0.4	1.5	60.2	balance

Tableau IV.2. Composition élémentaire de l'électrode en carbure de tungstène (WC).

IV.1.2.1.2. Méthode de rechargement et état de soudage

Le soudage à l'arc en métal blindé, mieux connu sous le nom de SMAW, a été attribué pour cette condition de soudage particulière en raison de son utilisation intensive dans les industries. La direction de soudage horizontale dans une approche de position à plat est pratiquée pendant le dépôt de rechargement dur de WC sur une lame en acier au carbone, comme illustré schématiquement Figure IV.2. La position du dépôt de soudure et l'emplacement de la découpe de l'échantillon sont présentés dans la Figure IV.2. Le tableau IV.3 montre l'état de rechargement en utilisant le soudage SMAW. 1, 2 et 3 couches de rechargement dur sont utilisées pour examiner l'influence du nombre de couches sur la microstructure du revêtement de rechargement WC. Le courant de soudage, le préchauffage de la lame et le séchage des électrodes sont maintenus pour étudier l'effet de la couche de soudage sur le rechargement dur. Le tableau IV.4 présente les paramètres de soudage utilisés.

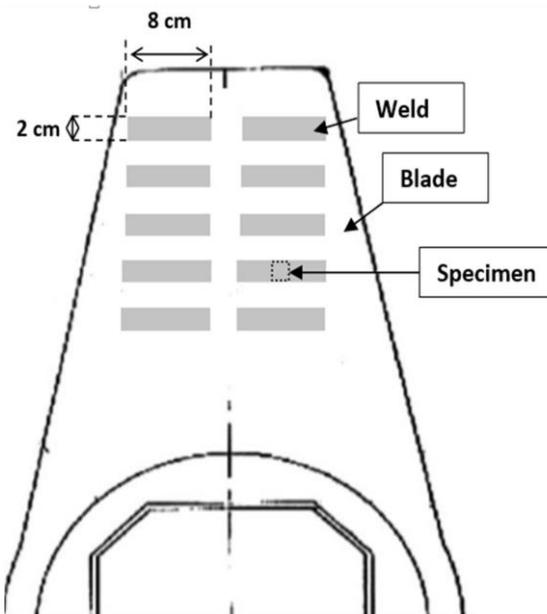


Figure IV.2. Schéma de principe du dépôt de rechargement dur sur lame en acier au carbone.

Taille de soudure	Vitesse de soudage	Polarité	Taux d'alimentation d'électrode	Longueur de soudage	Longueur d'électrode
2.0 cm	0.0025 m/s	DC	0.0035 m/s	8 cm	35 cm

Tableau IV.3. Conditions de soudage utilisant la méthode de soudage SMAW.

Echantillon	Couche	Courant (A)	Préchauffage de la lame	Séchage électrode
1	1	150	Oui	Oui
2	2	150	Oui	Oui
3	3	150	Oui	Oui

Tableau IV.4. Échantillons avec un nombre différent de couches de soudage.

IV.1.2.1.3. Coupe transversale de l'échantillon

Trois échantillons à divers endroits à partir de lames en acier au carbone à revêtement dur sont sectionnés comme illustré sur la figure IV.3. Les échantillons sont sectionnés en utilisant une coupe de fil EDM (usinage par décharge électrique) avec une dimension de 10 mm x 10 mm x 25 mm comme indiqué sur la figure IV.3a. La surface rugueuse des échantillons sectionnés est aplatie à l'aide de papier abrasif à partir de 100, 240, 500, 800, 1000, 1200 et 2000, qui ont une taille de particule de 162,0 µm, 58,5 µm, 21,8 µm, 18,3 µm et 10,3 µm respectivement et suivie par processus de polissage. Trois positions A, B et C sont focalisées sur chaque échantillon pour l'analyse de la microstructure comme illustré sur la figure IV.3b.

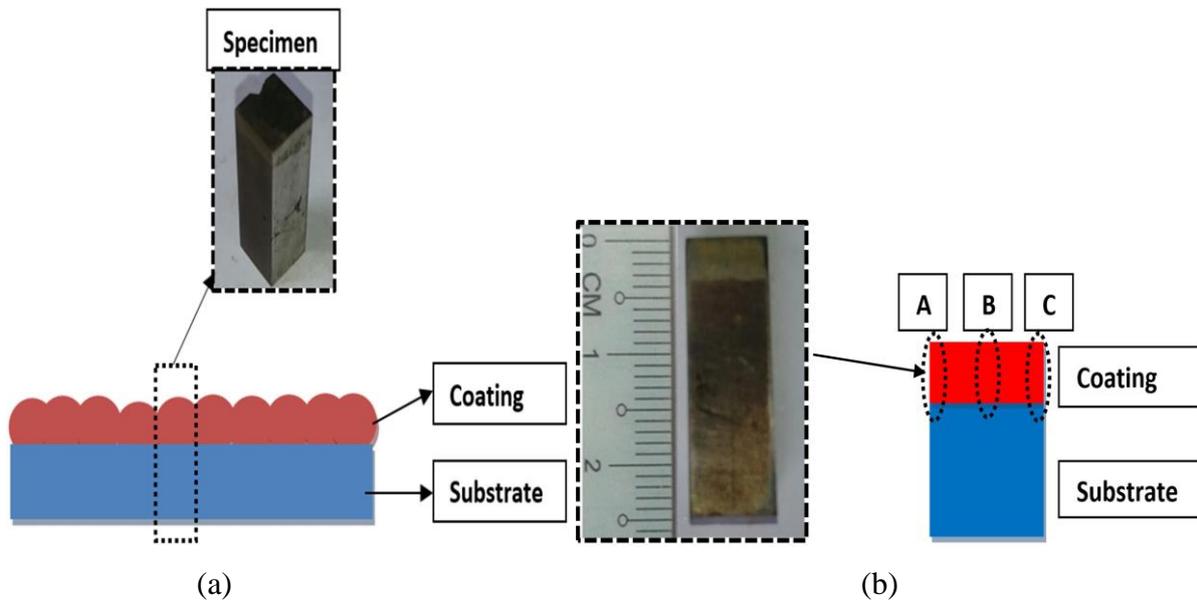


Figure IV.3. (a) Vue schématique de l'échantillon en coupe de la lame en acier au carbone et (b) position schématique en coupe de l'échantillon pour l'épaisseur du revêtement et les analyses MEB.

IV.1.2.2. Résultats et discussion

IV.1.2.2.1. Effet de la couche de soudure sur la croissance du carbure

La figure IV.4 montre l'effet de la couche de rechargement dur sur la microstructure du revêtement. La présente étude indique qu'un nombre plus élevé de couches de soudure (trois couches) a provoqué une présence de carbure de plus grande taille dans la région de revêtement par rapport à un nombre inférieur de couches. On constate progressivement que la présence de carbure de grande taille dans le revêtement augmente avec le nombre croissant de couches appliquées. La figure IV.5 illustre les effets de la couche de soudure sur la microstructure du revêtement de revêtement dur WC dans la région sans carbure (matrice). Les résultats de la présente étude montrent qu'au fur et à mesure que le nombre de couches augmente, la nucléation et la croissance de la particule WC augmentent en taille. Les images MEB montrées sur la figure IV.5 mettent en évidence le processus de nucléation du WC sous forme dendritique pour un cas à 1 couche. Lorsque le nombre de couches augmente à 2 et 3 couches, les particules de WC deviennent plus grosses. Le dépôt continu de plusieurs couches de soudure (trois couches) peut fournir de l'énergie thermique continue pour que le carbure se nucléé et se développe.

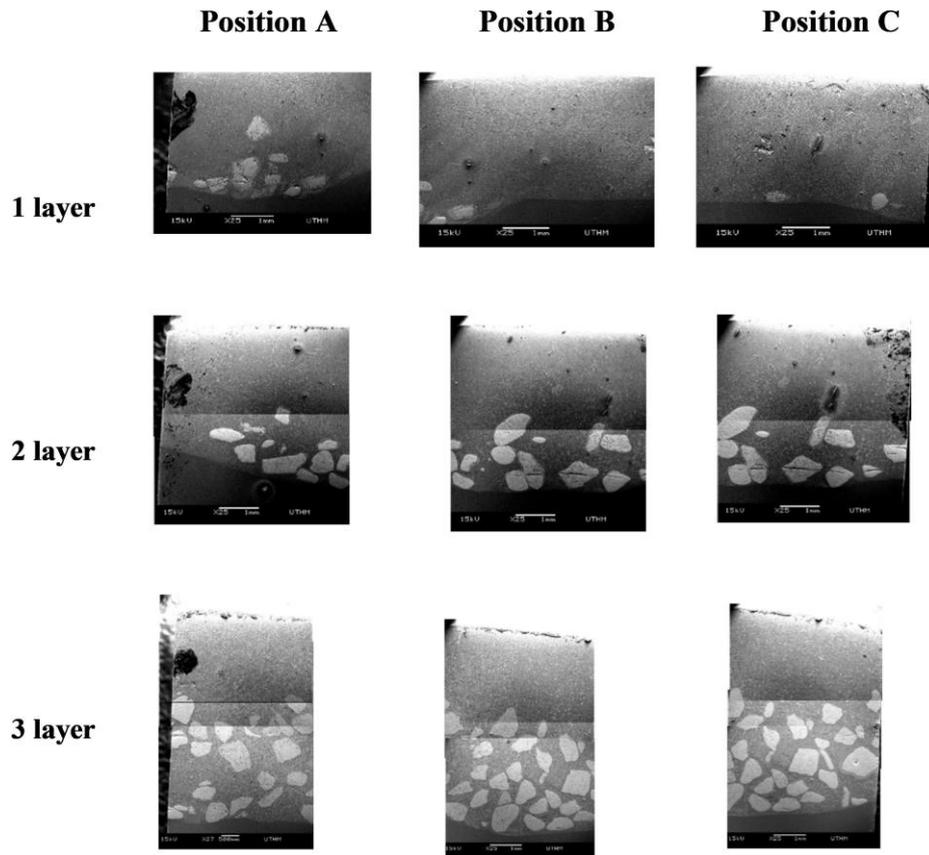


Figure IV.4. Microstructure de la région de revêtement globale pour un nombre différent de couches de soudage.

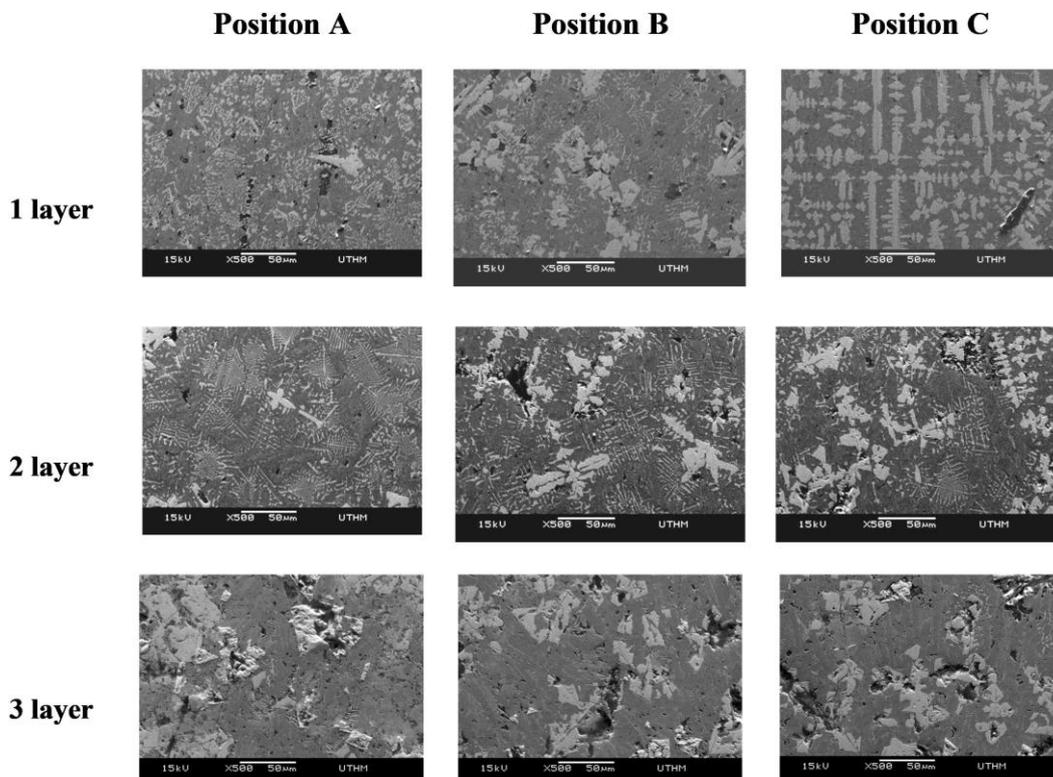


Figure IV.5. Microstructure de la région sans carbure (matrice) pour un nombre différent de couches de soudage.

IV.1.2.2.2. Analyse de microdureté

Les tests de dureté sont effectués à l'aide d'un testeur de dureté micro-Vickers d'une charge de 0,5 HV sur des éprouvettes pour différentes positions sur les régions du substrat, du carbure et non-carbure (matrice) respectivement. La figure IV.6 montre les valeurs de dureté des régions substrat, carbure et non carbure. Comme prévu, la région carbure avait une dureté supérieure par rapport à la région non carbure. La valeur de dureté enregistrée pour les régions de carbure est plus élevée (1795 HV) par rapport à la région sans carbure (814 HV). La valeur de dureté sera plus élevée si l'indentation est orientée vers la région du carbure.

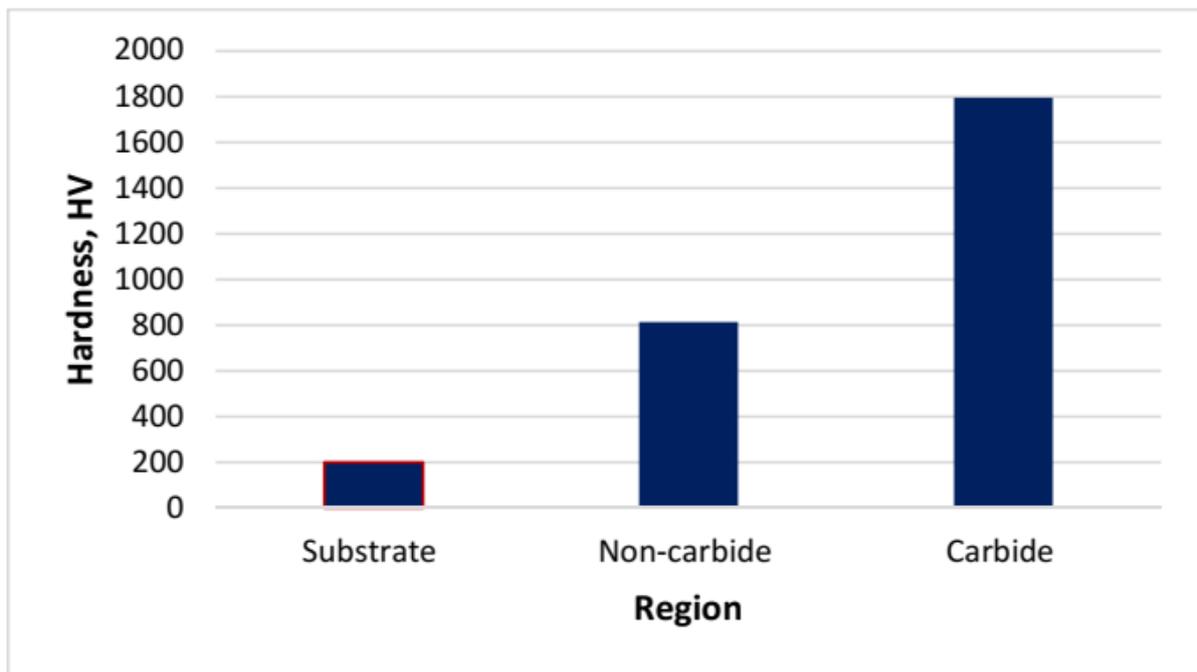


Figure IV.6. Valeur de dureté pour différentes régions de l'échantillon de lame en acier au carbone à face dure.

La valeur de dureté de la région sans carbure sur la lame à face dure avec un nombre différent de couches de soudure est illustrée sur la figure IV.7. Une valeur de dureté plus élevée est enregistrée pour un nombre élevé de couches de soudure (3 couches) par rapport à un nombre inférieur de couches (1 couche). Cela confirme la preuve de la croissance du carbure dans la région non-carbure (matrice) (figure IV.5). La dureté est fréquemment utilisée comme indicateur de la résistance à l'usure d'un matériau. Une dureté plus élevée conduira à une plus grande résistance à l'usure de la lame à face dure [25]. Ainsi, un nombre élevé de couches de soudure peut augmenter la dureté du rechargement dur et par la suite améliorer la résistance à l'usure.

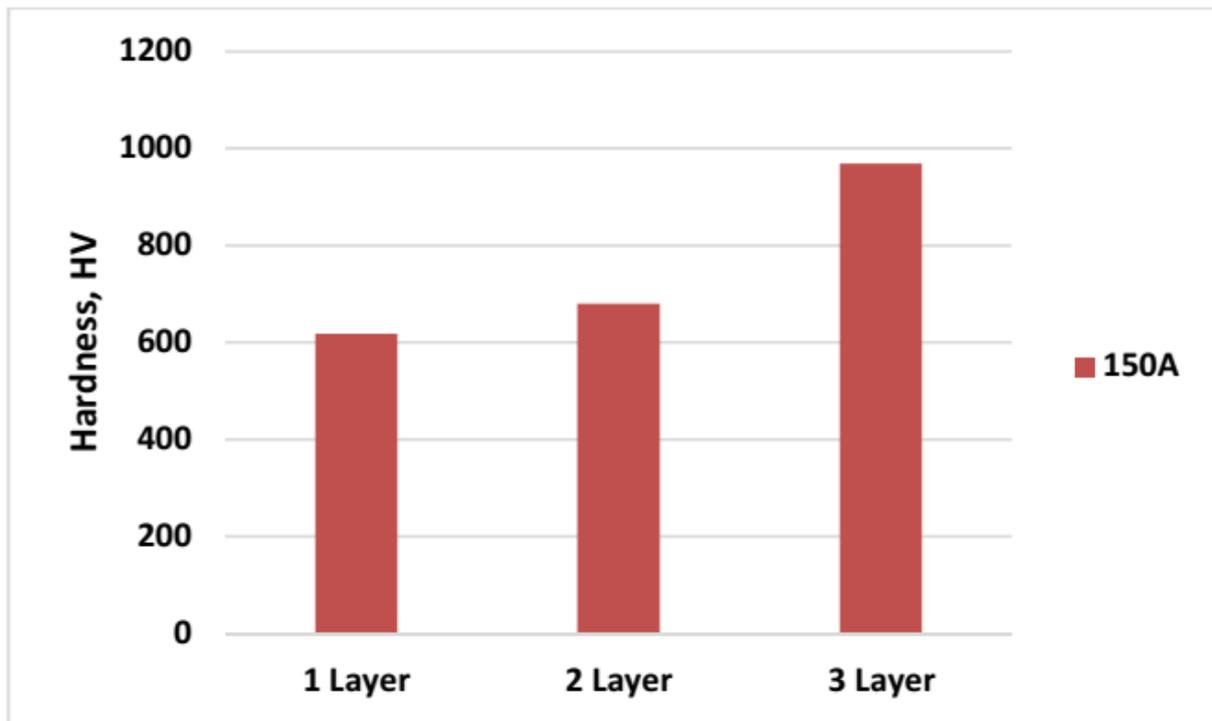


Figure IV.7. Valeur de dureté de la région sans carbure (matrice) pour différents nombres de couches de soudage

4. Conclusion

L'influence du nombre de couches de soudure sur la microstructure du revêtement nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- Le soudage continu de multiples couches de rechargement dur fournit une énergie thermique continue à la soudure, provoquant la nucléation et la croissance du WC dans la région sans carbure (matrice). Cela augmente ensuite la dureté globale du revêtement.
- la croissance du carbure de grande taille et l'uniformité de la distribution du carbure de petite taille dans la région de rechargement dur augmente avec le nombre de couches de soudage appliquées pendant le rechargement dur.
- L'augmentation du nombre de couches augmentera la dureté de la région non carbure (matrice) augmentant ainsi la dureté globale du revêtement. Cela fournira une meilleure résistance à l'usure du revêtement dur.

The text is enclosed in large, light blue, rounded brackets that are open on the left and right sides. The text is centered within these brackets.

**PARTIE
EXPERIMENTALE**

Partie II : partie expérimentale :

1. Présentation de l'entreprise

Les AMM ou bien les « Atelier Maghrébins de Mécanique » est une ancienne entreprise, qui se trouve dans le complexe sidérurgique à El-Hadjar. Ces ateliers Crie en 1989, son activité spécialisée en maintenance industrielle est divisée en deux segments principaux : la fabrication en pièces unitaires ou en série de pièces mécaniques et la réparation d'ensembles mécaniques qui sont assurées respectivement par ses deux unités : l'unité FABRICATION et l'unité REPARATION.



Figure 1 : Les AMM

2. Organigramme de l'entreprise :

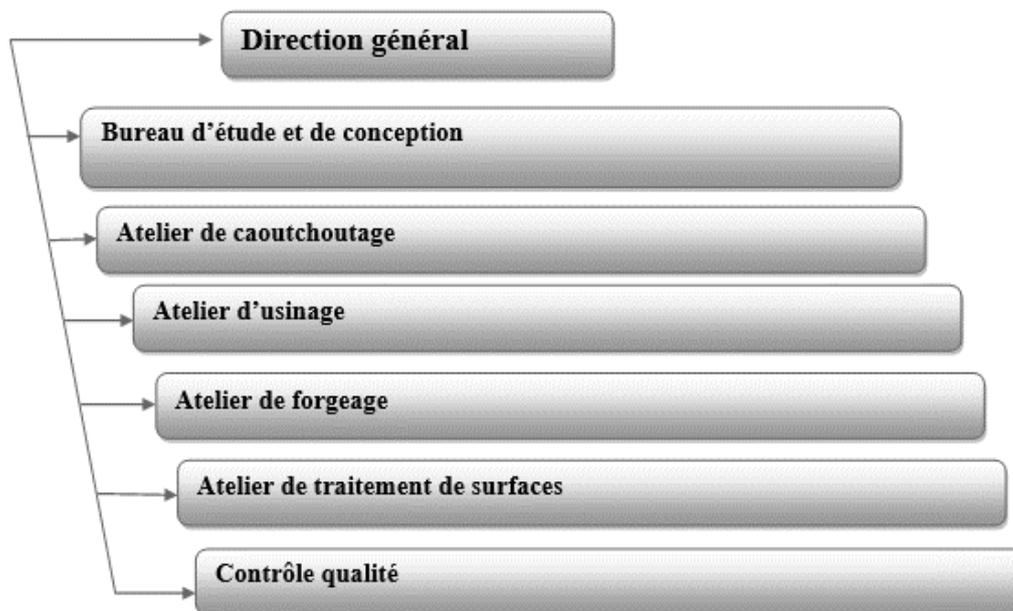


Fig.2 organigramme de l'AMM

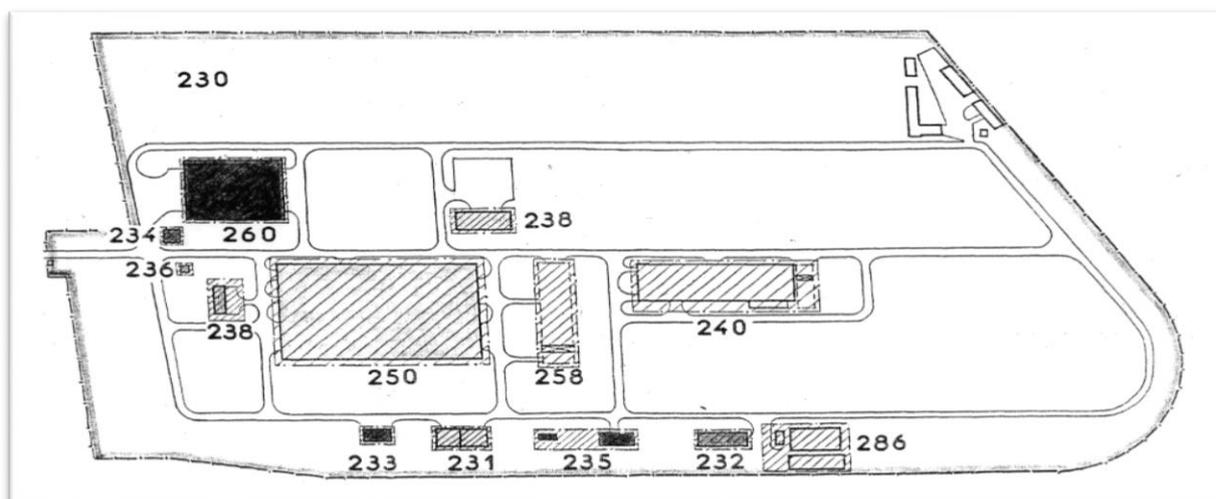


Figure.3 : Découpage zonal des AMM.

- 230** - AMM-service communs. **236** - Station de pompage des eaux usées **286** - Magasins centraux.
- 231** - Sous-traitance de distribution électrique. **238** - Services administratifs.
- 232** - Station des compresseurs **240** - AMM-Forage.
- 233** - Chaufferie. **250** - AMM-Usinage.
- 234** - Station de pompage du condensat **258** - AMM-parc a fer.
- 235** - Station de pompage des eaux apéro réfrigérants et décanteurs horizontaux.
- 260** - AMM-Caoutchoutage.

3. Unité fabrication :

Située à l'intérieur de l'enceinte du complexe ISPAT/ANNABA, sur un terrain de 360000m² et regroupe un ensemble d'ateliers, de bâtiments logistiques et réseaux divers :

- Un atelier MECANIQUE ou USINAGE (20160m²).
- Un atelier FORGE (5256m²).
- Un atelier de CAOUTCHOUTAGE (3240m²).
- Un atelier de TRAITEMENT DE SURFACE.
- Un parc à fer.
- Divers bâtiments auxiliaires.

4. Atelier mécanique, atelier d'usinage :

Equipé de 250 machines toutes spécialité (tournage, fraisage, taillage, rectification, affutage, rechargement, soudage, oxycoupage et traitement thermique)

Conçu pour la réalisation unitaire ou en petites séries de pièces mécaniques à partir d'ébauches de forge, de fonderie et produits laminés.

Equipé d'une centaine de machines-outils conventionnelles et à commande numérique destinée à la fabrication et à la rénovation d'équipements mécaniques.

Cet atelier regroupe un ensemble de machines universelles, réparties en :

- **Quatre secteurs de production :**

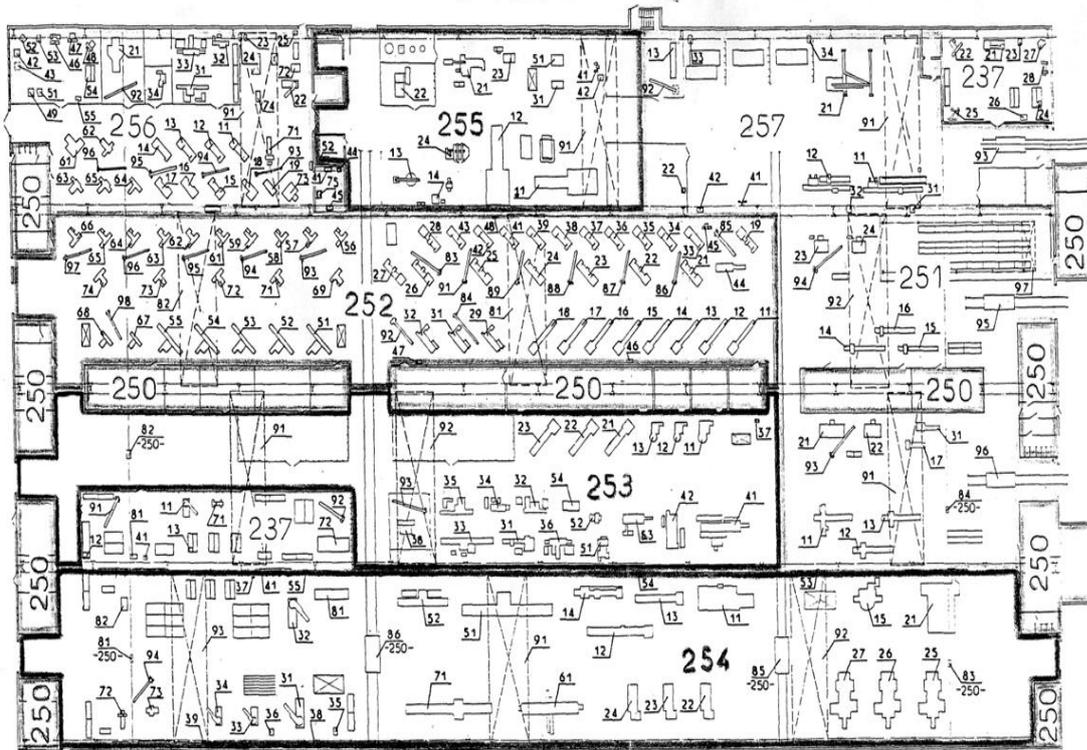


Figure.4 Plan pour l'atelier d'usinage

250-AMM-Services communs 251-Débitage 252-Petite mécanique
253-Moyenne mécanique 254-Grosse mécanique 255-Traitement thermique
256-Outillage. 257-Soudage et rechargement 237-Point d'appui entretien.

5. Service usinage

5.1. Atelier fraiseage :

Machines : fraiseuses conventionnelles et Commandes numériques

5.2. Atelier tournage :

Machines : tours conventionnelles et commandes Numériques

5.3. Atelier TTH :

Machines : four de recuit (four électrique), bain d'huile pour traitement thermique, postes à souder, oxycoupeur, Machine à chargement de métal sur rouleaux et chalumeaux.



Four CDO N°3



Four électrique CWUM-6λ2/9M104



Machine de trempe

5.4. Atelier moyenne et grosse mécanique :

Machines : tour parallèle, aléseuses rectifieuses amortisseuses taillage d'engrenage, perceuses et tours pour les grosses pièces.

5.5. Atelier outillage :

Machines pour affutage des outils de travail, tour pour les petites pièces et fraiseuses pour les petites pièces

5.6. Atelier d'oxycoupage et chaudronnerie (zone de soudage et rechargement)

Machine d'oxycoupage mobile, installation de rechargement, installation de rechargement, machine de rechargement, redresseurs de soudage 500A et 1000A, banc de soudage



Machine de rechargement



Redresseurs de soudage 500A et 1000A



Banc de soudage

5.6.1. Machines de coulée continue :

Weldclad a établi une norme de référence en ce qui concerne les performances des rouleaux de laminage tout au long du processus de coulée continue.

Les rouleaux Weldclad sont utilisés dans le monde entier sur des machines de coulée de brames, de blooms, de billette et de brames minces pour accroître la durée de vie des rouleaux et réduire les coûts d'entretien. Weldclad a mis au point le concept de « zonage » pour optimiser le choix des matériaux et des procédures de soudage ; les rouleaux de pied jusqu'aux rouleaux d'extraction ont ainsi démontré une microstructure de soudure constante et contrôlée, garantissant ainsi des performances supérieures et fiables. [17]



Figure 5 : Rechargement un rouleau

5.6.2. Gamme de consommables Weldclad :

Développée initialement pour le soudage à l'arc sous flux en poudre, la gamme de consommables Weldclad a été complétée pour inclure des produits sélectionnés pour des applications de soudage à l'arc visible et sous protection gazeuse. Les consommables Weldclad sont fabriqués conformément à des limites de spécifications rigoureuses, garantissant la cohérence des propriétés de la composition chimique des soudures, des microstructures et des caractéristiques mécaniques.

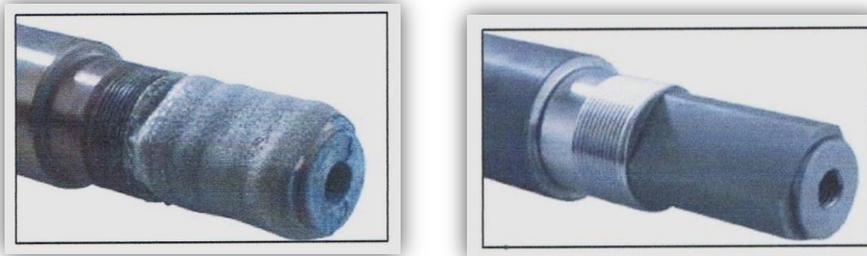
L'importante gamme de produits Weldclad assure l'équilibre approprié de propriétés pour chaque application. Qu'il s'agisse d'optimiser la résistance à la propagation des fissures, de garantir une résistance contre la corrosion/l'érosion ou d'optimiser la résistance à l'usure, il y aura toujours un consommable de soudage Weldclad approprié, même pour les conditions les plus rigoureuses [17].

5.6.3. Machines de soudage à la molette :

Disponible avec des têtes de soudage simple ou multiples et capables de souder plusieurs rouleaux en même temps, les machines de soudage à la molette Weldclad sont conçues pour assurer un rechargement et une remise en état efficaces et de qualité supérieure. Les machines sont robustes et conçues pour durer dans le temps. Les machines Weldclad sont basées sur le procédé de soudage à l'arc sous flux en poudre pour une efficacité optimale. Les vitesses de dépôt extrêmement élevées réalisables avec les machines de soudage à la molette Weldclad permettent d'obtenir un débit optimal. L'exposition aux rayons UV et aux émanations est éliminée avec le soudage à l'arc sous flux. Avec une intervention minimale de l'opérateur, la machine de soudage à la molette Weldclad définit les paramètres pour une opération de soudage à la molette efficace [17].

5.6.4. Une approche flexible :

L'approche de conception et de fabrication des machines axée sur les clients garantit des capacités des machines de soudage conformes à vos exigences spécifiques. Qu'il s'agisse du soudage de rouleaux de pied de 100 mm de diamètre ou de rouleaux pinceurs de 900 mm de diamètre.



a) Pièce rechargée b) Pièce usinée après rechargement

Figure 6 : pièce réparée. [18]

5.6.5. Equipement de rechargement par soudage au niveau des AMM

- Vue d'ensemble de l'installation de la machine de rechargement par soudage

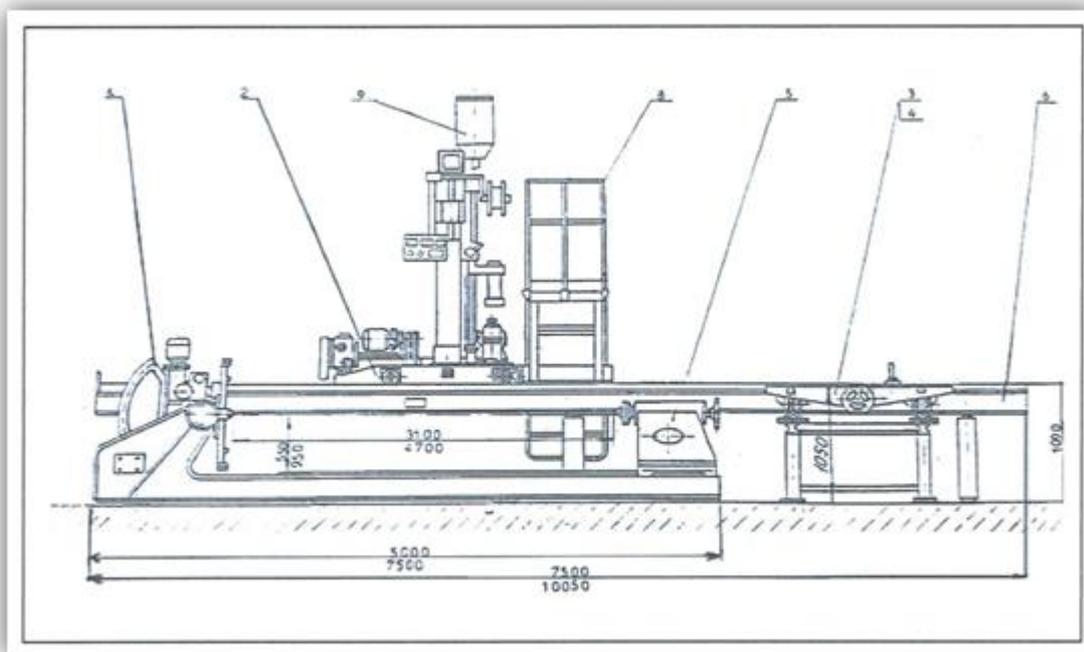


Figure 7 : machine de rechargement par soudage Weldclad

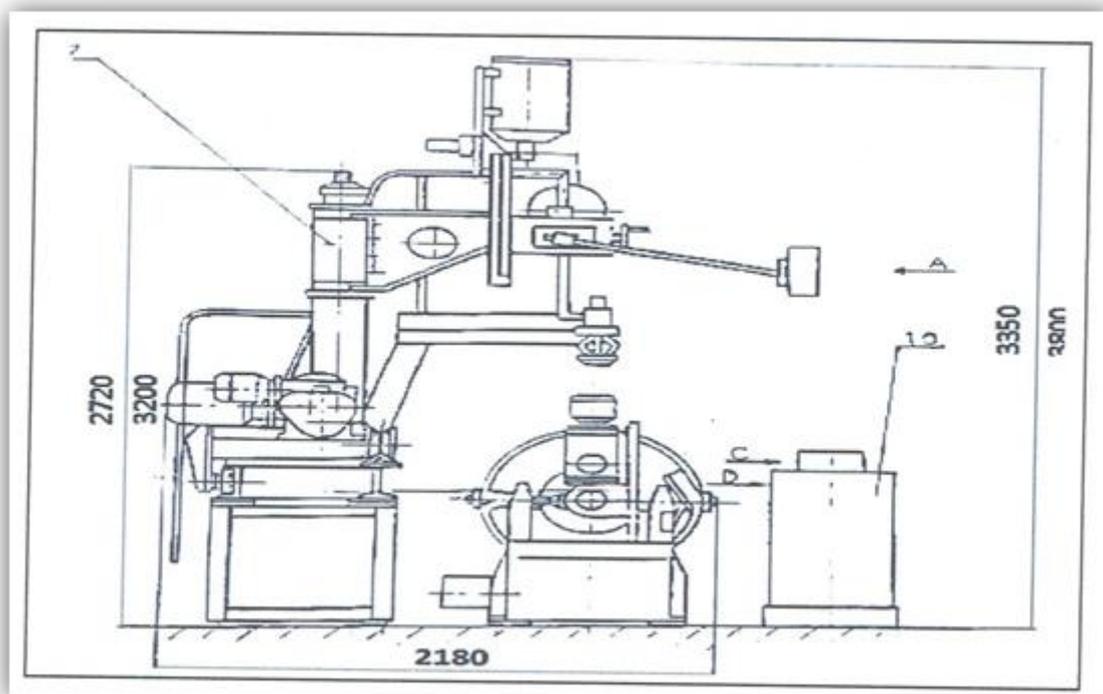


Figure 8: Projection latérale de la machine

N°	Désignations	Figures	Références	
			TMH - 4M	YMH -
1	Manipulateur	7	0 -13622	0 -13621
2	Chariot.		0 -20525	0 -20525-01
3	Table pour rechargement des pièces	7	1- 64517	
4	Plaqua mobile.	7	1- 64515	
5	Contre-poupée.	7	1 -71928	0 -12888
6	Châssis du chariot.	7	1-126368	1-128372
7	Consola de l'appareil da soudage	7	1-129526	1-129526-01
8	Passerelle.	7	1-134372	1-134375
9	Appareil da soudage automatique avec redresseur.	7	BDY-1202 ; BDY-506	
10	Equipement électrique.	8	4-469949	4-487773

Tableau 1 : Nomenclature des éléments constitutifs de la machine

5.6.6. Spécifications de la machine weldclad :

- Capacité de la machine : 4000 kg
- Diamètre maximum des composants : 450 mm (avec la trémie de flux installée) 900 mm (avec la trémie de flux enlevée)
- Hauteur au centre : 1070 mm
- Plage de vitesse de rotation : 0.023 à 1.5 tr/min

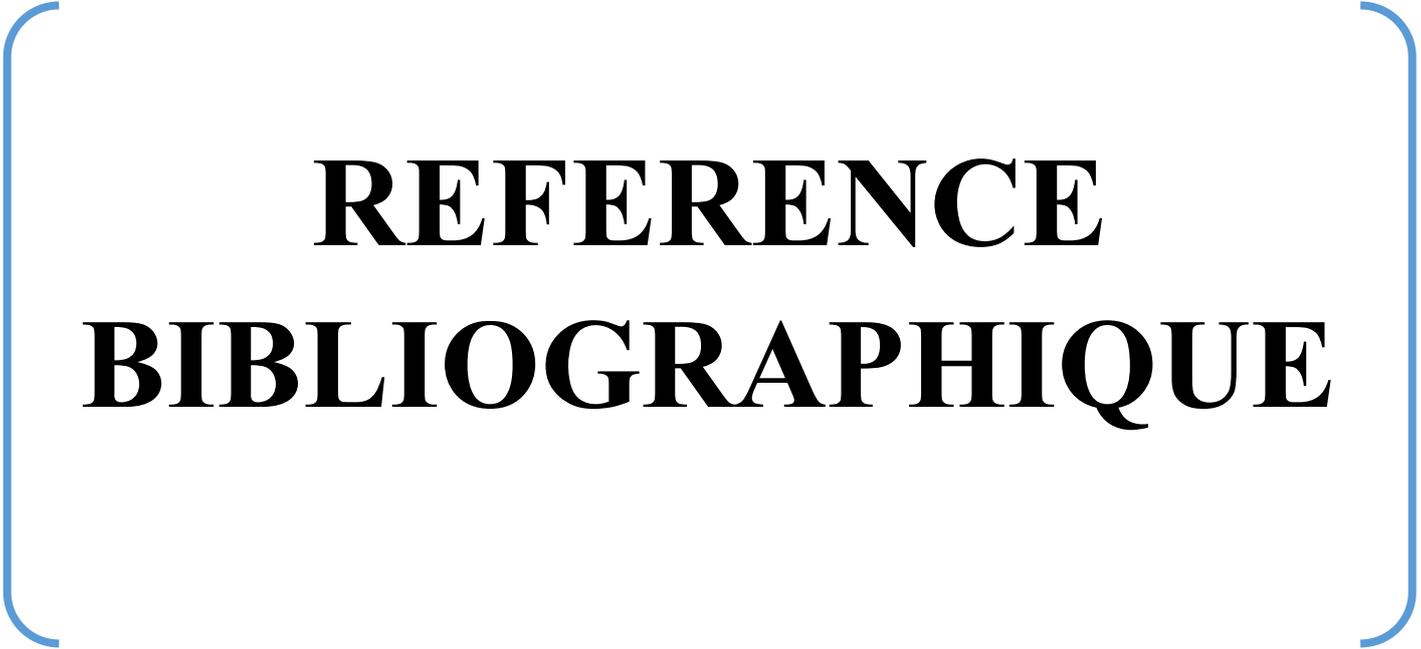
Conclusion générale :

L'augmentation du rendement dans les chaînes de fabrication et de protection et la forte sollicitation des éléments des machines, influent sur la durée de vie des machines.

Comme solution, le rechargement par soudage peut prolonger la durée de ces pièces en menant une réduction générale de coûts.

Les rechargements sont effectués pour améliorer la résistance à diverses sollicitations telles que le choc, l'abrasion métallique, le frottement, la pression (laminage), la cavitation, la corrosion et/ou une combinaison de ces sollicitations y compris aussi pour des raisons esthétiques. Lors de rechargement par soudage, pratiquement tous les procédés sont utilisables. Selon la nature et les propriétés recherchées après rechargement, celui-ci peut être effectué en couches successives de nuances appropriées jouant un rôle de transition depuis les propriétés métallurgiques, chimiques, mécaniques du substrat vers celles requises finalement.

Le rechargement est appliqué dans plusieurs domaines : industrie légère et lourde, appareils à pression, pipemills, industrie pétrochimique ...ex.

A pair of large, light blue, rounded brackets framing the text. The left bracket is on the left side, and the right bracket is on the right side, both opening towards the center.

REFERENCE
BIBLIOGRAPHIQUE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] ALAIN PRONER revêtement par projection thermique Technique de l'ingénieur année M1645, (2001).
- [2] <https://www.metalsupermarkets.com/the-best-metals-for-welding/>
- [3] document assemblage thermique par soudage
- [4] Revêtements anti-usure pour une plus longue durée de vie, Guide de la Réparation et Maintenance par Soudage, ESAB, , pp 3-39. 2e édition, (2003).
- [5] www.technogenia.com/fr/rechargement-dur
- [6] www.esab.com.
- [7] H.GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [8] C.LEYMONIE , R.BOUVEROT. Contribution à l'étude des traitements thermiques après soudage d'aciers faiblement alliés. Soudage et techniques connexes N°1/2 1970
- [9] C.BOUHELIER, Traitements thermiques des constructions chaudronnées
Note technique de CETIM N°21, Décembre 1981
- [10] J. SEDRIKS. Corrosion of Stainless Steels.John Wiley& sons, Inc, (1979).
- [11] R. N. GUNN. Duplex Stainless Steels, (2000).
- [12] J. SEDRIKS. Corrosion of Stainless Steels.John Wiley& sons, Inc , (1979).
- [13] M. MASSIN ; METALLURGIE PRATIQUE POUR MECANICIENS (pages 53-79).
Pycédition.Paris, (1983).
- [14] Yang Qingxiang, R'e,n Xuejun, Liu Ligang, Li Da Dong Haifeng, Liao Bo,
Mechanism of Cracking Resistance of Hardfacing Specimens of Steel 5CrNiMo Improved by
Rare Earth Oxide, JOURNAL OF RARE EARTHS 24 471 – 478, (2006).
- [15] B. HICHEM « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers »,
Juin 2013.

- [16] Pierre-jean CUNAT. "Aciers inoxydables", critères de choix de la structure, les Techniques d'Ingénieur, traité matériaux métalliques M4540, 2001.
- [17] www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-the-holloman-jaffe-parameter
- [18] B. HICHEM « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers », Juin 2013.
- [19] Luc Fairon. "Introduction au soudage" (Ingénieur souder ESSA EWER FR 0466).
- [20] R.BOURGEOIS. Mémothech, Génie des matériaux, édition éducative 2001
- [21] N.CAVALLO. Contribution à la validation expérimentale de modèles décrivant la ZAT lors d'une opération de soudage, thèse de doctorat, INSA, Avril1998
- [22] CEMEQ, Module 9, chap2, LE SOUDAGE À L'ARC SUBMERGE SAW, (2000).
- [23] Upadhyaya, G. S. (1998). Cemented tungsten carbides: production, properties and testing. William Andrew.
- [24] Jankauskas, V., Antonov, M., Varnauskas, V., Skirkus, R., & Goljandin, D. (2015). Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hardfacings with low-carbon or stainless steel matrix. *Wear*, 328, 378-390.
- [25] Chotěborský, R., Hrabě, P., Müller, M., Válek, R., Savková, J., & Jirka, M. (2009). Effect of carbide size in hardfacing on abrasive wear. *Research in Agricultural Engineering*, 55(4), 149- 158.
- [26] Weldclad brochure FR PDF.
- [27] Revue Métallurgie (cahier d'informations Technique) 83e N°10 Octobre 1986 Usure des Cannelures page 739.
- [28] Alliages de rechargement dur PDF.