

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie
Département : Génie mécanique
Domaine : Sciences et techniques
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**CONTRIBUTION A L'AMELIORATION
DE LA QUALITE DES CONSTRUCTIONS SOUDEES**

Présenté par : *Derouiche rami*

Encadrant : *LAGRED Ahmed* Grade Professeur Université UBMA

Jury de Soutenance :

Mr.Zitouni	Grade	UBMA	Président
Mr.Lagred	Professeur	UBMA	Encadrant
Mr.DIB	Grade	UBMA	Examineur
TAHAR CHAOUCHE MOHAMED AMINE	Chef de service	Unité AMM/ Sider-El Hadjar Annaba	Membre invité

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier d'abord (وتعالى سبحانه الله) de nous avoir accordé longue vie, santé et les conditions nécessaires pour la réalisation de ce document.

Nous remercions Mr.LAGRED pour l'opportunité donnée en acceptant de diriger notre mémoire, pour ses conseils et ses critiques tout le long de l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions toutes les personnels de l'unité AMM qui nous ont aidé à réaliser notre mémoire de fin d'études notamment l'ingénieur Mr : TAHAR CHAOUCHE MOHAMED AMINE du terrain ainsi l'ingénieur Mr : ALLAM FAOUZI qui avaient été perpétuellement pour ses soutiens et ses efforts et son temps précieux à notre disponibilité et prêt à répondre à nos questions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à toute l'équipe de Sider-El Hadja Annaba.
Aussi à remercier l'ensemble des enseignants du département de génie Mécanique de
l'université de Guelma.

Nous n'oublions pas également nos camarades de classe avec qui on a vécu des moments de joies et de réussite dans le respect et la fraternité.

En fin nous remercier les membres du jury pour le temps précieux qu'ils ont consacré à la lecture et à l'évaluation de ce projet

Merci à tous à toutes

DEDICACE

Avant tous, je remercie DIEU le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce Travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce fruit de mes années d'études les plus chère au monde

A:

A la personne la plus chère pour moi dans ce monde ma mère qui est la fleur de ma vie, le symbole de l'amour et la tendresse qui s'est sacrifier pour mon bonheur et ma réussite.

A mes chers frères

A toute ma famille pour leurs soutiens et encouragements.

A tous les ingénieurs de l'unité AMM de Sider-El Hadja Annaba

À tous les professeurs et enseignants qui m'ont suivi durant tout mon cursus scolaire et qui m'ont permis de réussir dans mes études.

A tous mes respectueux collègues.

A mes chers amis et à tous ceux que j'aime

CHAPITRE I. LES ASSEMBLAGES MECANIQUES :

I.	Introduction :.....	1
II.	Différents types d'assemblage :.....	2
1)	L'assemblage permanent :.....	2
2)	L'assemblage démontable :.....	2
3)	L'assemblage direct :.....	3
4)	L'assemblage indirect :.....	3

CHAPITRE II. PROCEDES D'ASSEMBLAGE PAR SOUDAGE :

II.1.	Procédé du soudage oxyacétylénique :.....	4
II.1.1.	Définition :.....	4
II.1.2.	Principe du procédé :.....	4
II.1.2.1.	Brasage :.....	5
II.1.2.2.	Souda-brasage :.....	6
II.1.2.3.	Soudage :.....	7
II.1.2.4.	Opérations de soudage :.....	7
	A. Catégories principales de soudage :.....	7
	1. Soudage par fusion:.....	7
	2. Soudage par pression:.....	7
	B. Étapes typiques d'une opération de soudage :.....	10
II.1.2.5.	Domaine d'application :.....	10
II.	2. Procédé de soudage MIG-MAG :.....	10
II.	2.1.	
	Définition :.....	10
II.	2.2. Principe du procédé :.....	11
II.	2.3. Avantages et inconvénients :.....	12
	a) Les avantages de la soudure MIG-MAG :.....	12
	b) Les inconvénients de la soudure MIG-MAG :.....	13
III.	2.4. Domaines d'application :.....	13

CHAPITRE III. PROCEDE DU SOUDAGE SOUS ATMOSPHERE CONTROLEE

III.	1. Définition :.....	15
III.	2. Principe du procédés :.....	15
	2.1. Création de l'arc électrique :.....	15
	2.2. Injection du gaz de protection :.....	15
	2.3. Fusion et liaison des métaux :.....	16

	2.4. Refroidissement sous protection :.....	16
III.	3. Avantages et inconvénients.....	16
III.	4. Domaines d'application :.....	17

CHAPITRE IV. PROCEDE DU SOUDAGE DES POLYMERES :

IV.	1.	
	Définition :.....	18
IV.	2. Principe du procédés :.....	18
IV.	3. Avantages et inconvénients :.....	19
IV.	4. Domaines d'application :.....	19

CHAPITRE V. CALCUL DES CORDONS DE SOUDURE

V.	1. Introduction (théorie) :.....	21
	➤ Types de cordons de soudure :.....	21
	➤ Principes de calcul :.....	21
V.	2.Calcul des cordons de soudure frontaux :.....	21
V.	A Définition :.....	21
	B. Hypothèses de calcul:.....	22
	➤ Calcul des cordons d'angle frontaux:.....	22
V.	3. Calcul des cordons de soudure latéraux :.....	23
	➤ Calcul des cordons d'angle latéraux:.....	25
V.	4. Calcul des cordons de soudure obliques :.....	27

Chapitre VI. Défauts des assemblages par soudage :

VI.	1. Introduction:.....	29
VI.	2. Les principaux défauts de soudure :.....	29
	– Les défauts de soudage:.....	29
	a) Les fissures:.....	30
	b) Les soufflures:.....	30
	c) La pollution ferreuse.....	31
	d) Les inclusions.....	31
	e) Les retassures et criques de solidification:.....	31
VI.	3. Les inclusions gazeuses :.....	35
VI.	3.1Définition:.....	35
VI.	3.2 Origine des gaz :.....	35

	3.2.1. Types d'inclusions gazeuses:.....	35
	3.2.2. Conséquences sur la soudure :.....	36
	3.2.3. Causes principales:.....	36
	3.2.4. Prévention des inclusions gazeuses:.....	36
	3.2.5. Détection des porosités :.....	36
VI.	4. Les inclusions solides :.....	37
	4.1 Définition:.....	37
	4.2 Types d'inclusions solides:.....	37
	4.3 Conséquences sur la soudure:.....	37
	4.4 Causes principales:.....	38
	4.5 Prévention des inclusions solides:.....	38
	4.6 Méthodes de détection:.....	38
VI.	5.Défauts de fusion :.....	38
	5.1. Définition:.....	38
	5.2. Types de défauts de fusion:.....	39
	5.3. Conséquences sur la soudure:.....	39
	5.4. Causes fréquentes:.....	39
	5.5. Prévention:.....	40
	5.6. Méthodes de détection:.....	40
VI.	6. Défauts de pénétration :.....	40
	6.1. Définition:.....	40
	6.2. Types de défauts de pénétration:.....	40
	6.3. Conséquences:.....	41
	6.4. Causes fréquentes:.....	41
	6.5. Prévention:.....	41
	6.6. Méthodes de détection:.....	41
	6.7. Sources techniques fiables:.....	41

CONCLUSION

Liste des figures

Figure I. 1 : Carrosserie d'une voiture.....	2
Figure I. 2 : Money d'assemblage démontables	2
Figure I. 3 : Assemblage direct.....	3
Figure I. 4 : Clavettes parallèles principales dimensions normalisées	3
Figure II. 5: chalumeau OA oxyacétylénique (flamme).....	4
Figure II. 6: Composition d'une installation de soudage a la flamme.....	5
Figure II. 7 : Poste de soudage oxyacétylénique MICATRONIC MIG 545.....	5
Figure II. 8: opération d'assemblage par brasage.....	8
Figure II. 9 : Soudage par friction (linéaire).....	8
Figure II. 10: Soudage par friction (rotatif).....	8
Figure II. 11: Resistance Heated High Vacuum Treatment Furnace With Integrated.....	9
Figure II. 12 : Soudage à l'état solide (explosion).....	10
Figure III. 13 : SOUDAGE MIG/MAG AUTOMATISÉ SUR ROBOT PROCÉDÉS 131-135.....	11
Figure III . 14: à atmosphère contrôlée pour soudage laser.....	15
Figure IV. 15 : Procédé de soudage des tuyaux en polyéthylène	19
Figure V. 16 : Symboles élémentaire soudure bout a bout.....	24
Figure VI. 17 : Soudeur équipé.....	31
Figure VI. 18: Exemples de fissures sur aluminium.....	32
Figure VI. 19 : Les différents types de soufflure.....	33
Figure VI. 20: Exemple de soufflures.....	33
Figure VI. 21 : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.....	35
Figure VI. 22 : : Inclusions de laitier.....	37

List des tableaux

Tableau IV.1 : Types d'inclusions gazeuses	35
Tableau IV.2 : Types d'inclusions solides	37
Tableau IV.3 : Types de défauts de fusion	39
Tableau IV.4 : Types de défauts de pénétration	40

CHAPITRE I.

LES ASSEMBLAGES MECANIQUES :

CHAPITRE I. LES ASSEMBLAGES MECANIQUES :

I. Introduction :

Dans un contexte industriel où la fiabilité et la performance des assemblages mécaniques sont devenues des exigences incontournables, la soudure occupe une place centrale en tant que procédé d'assemblage permanent. Utilisée dans des domaines variés tels que la construction métallique, l'automobile, l'aéronautique ou encore le secteur énergétique, la soudure permet de réaliser des structures complexes, résistantes et durables.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, le soudage reste un procédé délicat, influencé par de nombreux paramètres tels que la nature des matériaux, le choix du procédé, les conditions de mise en œuvre, ou encore les compétences de l'opérateur. Ces facteurs peuvent entraîner l'apparition de défauts pouvant compromettre la solidité, la durabilité ou la sécurité des constructions réalisées. Il devient donc essentiel de maîtriser non seulement les procédés de soudage, mais aussi les méthodes de contrôle et d'assurance qualité.

Dans ce cadre, ce projet de fin d'études s'inscrit dans une démarche d'amélioration de la qualité des constructions soudées. L'objectif principal est d'identifier les sources possibles de défauts dans les assemblages soudés, d'évaluer leur impact sur la performance des structures, et de proposer des solutions techniques et méthodologiques permettant d'améliorer la qualité globale des soudures.

Ce travail combine une approche théorique, à travers une étude approfondie des procédés de soudage, des défauts typiques et des techniques de contrôle qualité, ainsi qu'une approche pratique, incluant des essais expérimentaux sur des échantillons soudés, afin de valider les pistes d'amélioration proposées.

I.1. Différents types d'assemblage :

I.1.1. L'assemblage permanent :

est un type d'assemblage qui se caractérise par son **caractère définitif**. Une fois réalisé, l'assemblage ne pourra plus être modifié sans détruire ou détériorer l'une des pièces assemblées.

L'assemblage permanent se fait grâce à différentes techniques telles que la soudure, le clivage, le scellement, le fretage, l'utilisation de certaines colles ou d'adhésifs.

🔗 Exemple d'assemblage permanent : les éléments du châssis d'une voiture sont soudés entre eux.



Figure I. 1 : Carrosserie d'une voiture

I.1.2. L'assemblage démontable :

Avec un **assemblage démontable**, les pièces reliées entre elles peuvent être séparées sans être détruites ou altérées. En revanche, très souvent, l'accessoire utilisé pour créer la liaison n'est pas utilisable une seconde fois.

L'assemblage démontable est rendu possible grâce à des accessoires tels que les clous, rivets ou agrafes.

Les techniques d'assemblage sont variées : assemblage par clou, [vis](#), rivet, brasure, agrafage, [goupille](#), clavette, fretage...

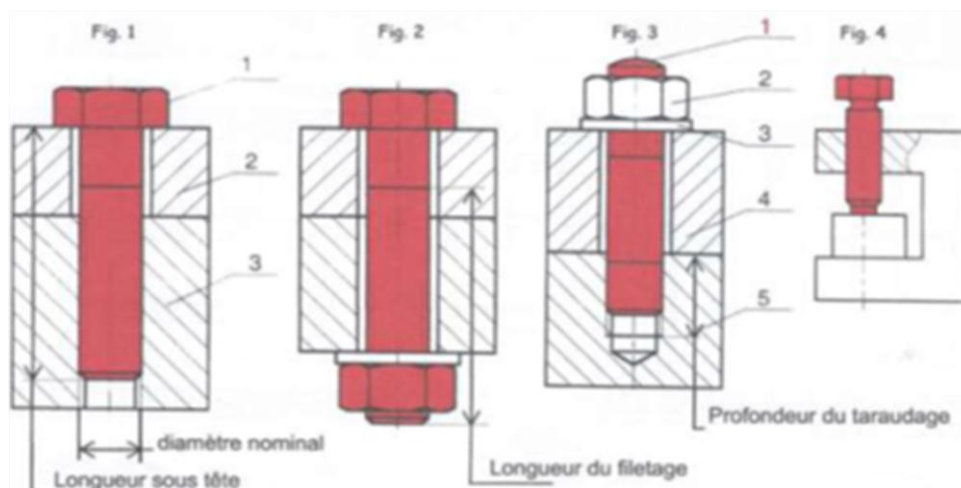


Figure I. 2 : Moneys d'assemblage démontables

I.1.3. L'assemblage direct :

On parle d'**assemblage direct** lorsque l'assemblage mécanique se fait sans l'utilisation de pièces ou d'accessoires intermédiaires. Cela est possible lorsque deux pièces ont des complémentarités dans leurs formes : il suffit alors de les emboîter simplement.

Pour réaliser un assemblage direct, les techniques de frettage, soudage, clinchage ou d'emboîtement élastique sont recommandées.

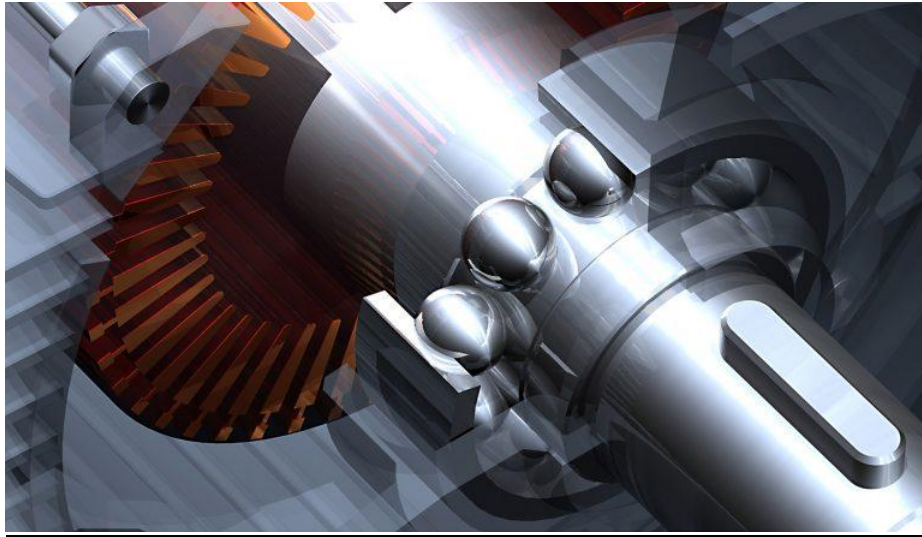


Figure I. 3 : Assemblage direct

I.1.4. L'assemblage indirect :

Pour un **assemblage indirect**, on aura besoin d'un autre élément pour lier les deux pièces entre-elles. C'est le cas avec les techniques d'assemblage par collage, agrafage, [visserie](#), assemblage par rivet ou par clou.

Exemple d'assemblage indirect : pour lier une poulie à un arbre, on utilisera une clavette.

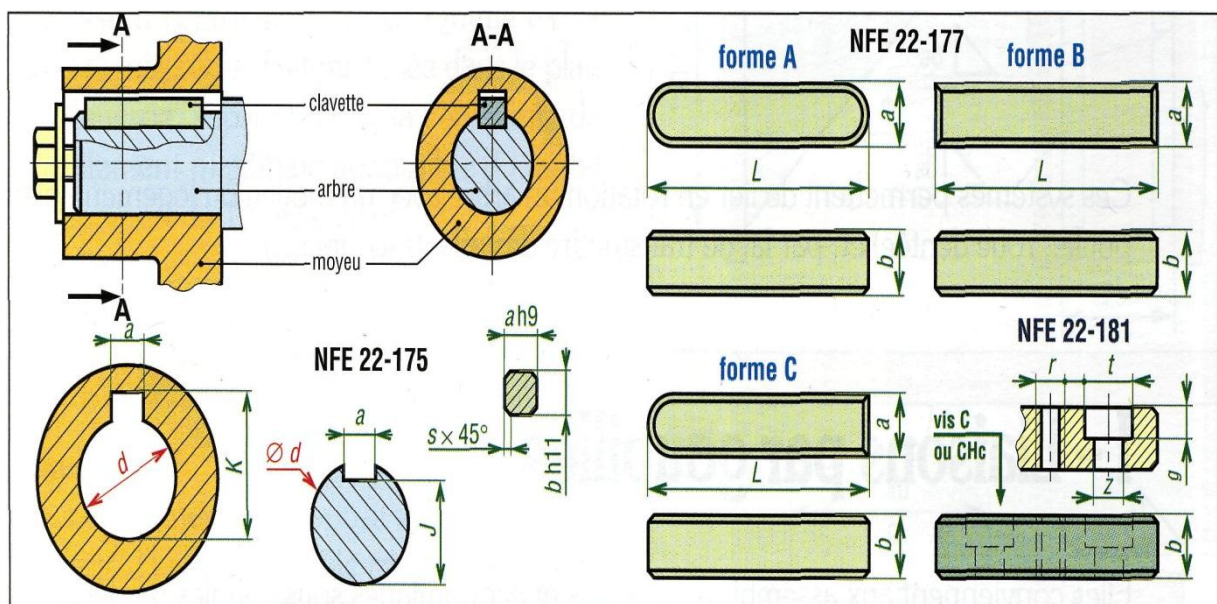


Figure I. 4 : Clavettes parallèles principales dimensions normalisées.

CHAPITRE II. PROCEDES D'ASSEMBLAGE PAR SOUDAGE :

CHAPITRE II. PROCEDES DASSEMBLAGE PAR SOUDAGE.

II.1 . Procédé du soudage oxyacétylénique :

II.1.1. Définition :

Le soudage oxyacétylénique consiste à chauffer les pièces à souder jusqu'à leur assemblage par fusion. Ce résultat est obtenu au moyen d'une flamme oxyacétylénique (créée à partir d'oxygène et d'acétylène), avec ou sans ajout de métal d'apport.



Figure II. 5: chalumeau OA oxyacétylénique (flamme)

Dans le cas d'un assemblage où le métal d'apport et le métal de base sont de même nature, on parle de soudage autogène. Le métal d'apport et le matériau à souder ont alors une température de fusion identique.

Le soudage oxyacétylénique est un procédé qui repose sur la combustion de l'oxygène et de l'acétylène, mélangés entre eux pour former une flamme d'une température d'environ 3 200°C. L'action chimique de la flamme oxyacétylénique peut être régulée en modifiant le rapport du volume d'oxygène et d'acétylène .

II.1.2. Principe du procédé :

Le chalumeau de soudage est relié par des boyaux d'amenée de gaz sur la bouteille de gaz combustible d'acétylène (pression de service 0,25 bar) et sur la bouteille de gaz comburant d'oxygène (pression de service 3,5 bar) par l'intermédiaire d'un manodétendeur placé sur chaque bouteille avec un dispositif de sécurité d'anti-retour. Le soudeur ouvre les robinets des bouteilles de gaz, puis ouvre en premier le robinet de l'acétylène du chalumeau, enflamme le gaz, ensuite ouvre le robinet d'oxygène et règle le mélange pour obtenir une flamme neutre

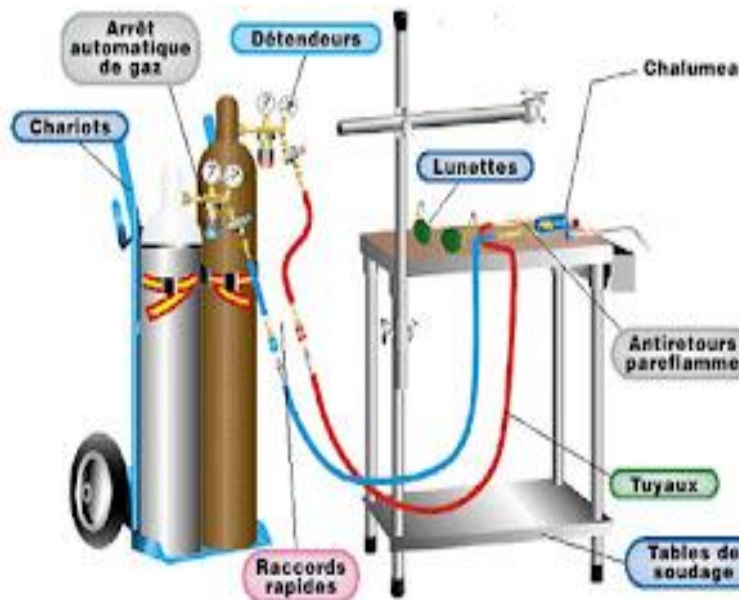


Figure II. 6: Composition d'une installation de soudage a la flamme



Figure II. 7 : Poste de soudage oxyacétylénique MICATRONIC MIG 545

Le soudage oxyacétylénique peut être utilisé dans différentes situations, telles que : soudage de tôles fines, de tubes de faible diamètre, brasage et soudo-brasage.

Il existe deux techniques différentes de soudage oxyacétylénique :

- **Sans métal d'apport :**
Cela consiste à réaliser un cordon avec le chalumeau sur le matériau de base, mais sans apport de métal (les deux matériaux sont chauffés jusqu'à leur point de fusion).
- **Avec métal d'apport :**
Cela consiste à fusionner les bords des pièces créant ainsi un bain de fusion, dans lequel est rajouté le métal d'apport sous forme de baguette.

II.1.2.1. Brasage :

Le brasage est un processus d'assemblage qui se réalise par la fusion d'un métal additionnel, sans que le métal de base ne soit fondu.

L'application du brasage nécessite, en premier lieu, de chauffer les deux éléments à assembler et par la suite d'utiliser un métal d'apport qui va se liquéfier lorsqu'il sera en contact avec ces derniers (et non sous l'effet de la chaleur émise par le fer à souder). À mesure qu'il devient plus malléable, le métal additionnel se propage par capillarité. Les deux pièces deviennent inséparables à mesure qu'elles se refroidissent. [1]



Figure II. 8: opération d'assemblage par brasage

On distingue différentes sortes de brasage : le brasage à basse température et le brasage à haute température. Le brasage fort requiert des températures de fusion comprises entre 600°C et 1000°C, tandis que le brasage tendre nécessite une fusion du métal d'apport à moins de 450°C.

Quand vous effectuez une brasure, vos deux éléments métalliques ne forment pas de liaisons atomiques, ce qui nécessite l'utilisation d'un autre métal pour établir la connexion entre les deux. [1]

II.1.2.2. Souda-brasage :

Le souda-brasage des aciers au carbone, du fer et des aciers faiblement alliés exige une préparation méticuleuse des pièces : élimination des graisses, oxydation ou toute autre substance indésirable. Un décapant sera appliqué sur le métal brut pour améliorer son mouillage (capacité d'un liquide à se répartir sur une surface). [1]

Les atouts du souda-brasage incluent : une technique d'application rapide et simple, un prix modique et des déformations minimales. Les domaines concernés sont : la serrurerie et la carrosserie métallique, la plomberie ainsi que l'industrie automobile. [1]

II.1.2 .3. Soudage :

Le **soudage** est une opération qui permet de **fusionner deux parties**. Pour cela, il faut les amener à une température suffisante pour qu'elles fondent. La chaleur que vous apportez se concentre directement sur la zone à souder.

Une soudure s'obtient par fusion des matériaux et métal d'apport.

Lorsque vous procédez à une soudure entre deux pièces de métal, en fondant sous la chaleur, elles créent des liaisons atomiques entre elles qui leur permettent de s'unifier parfaitement.

II.1.2 .4. Opérations de soudage :

Les **opérations de soudage** regroupent un ensemble de procédés utilisés pour assembler de manière permanente deux ou plusieurs pièces, généralement métalliques, par fusion ou par pression. Voici un aperçu des principales opérations et techniques de soudage :

A. Catégories principales de soudage :

1. Soudage par fusion

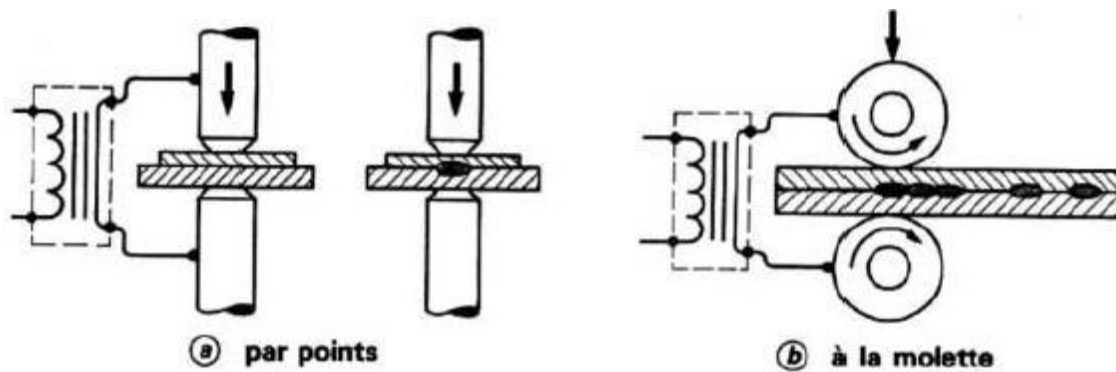
Les métaux sont fondus à haute température, souvent avec un métal d'apport.

- **Soudage à l'arc électrique :**
 - **SMAW** (Shielded Metal Arc Welding) ou électrode enrobée
 - **GMAW** (MIG/MAG)
 - **GTAW** (TIG)
 - **FCAW** (Fil fourré)
- **Soudage au gaz :**
 - Oxyacétylénique
- **Soudage au laser ou par faisceau d'électrons**

2. Soudage par pression

Aucune fusion totale : la chaleur et la pression permettent l'assemblage.

- Soudage par résistance :



- Soudage par friction (linéaire, rotatif, stir welding)

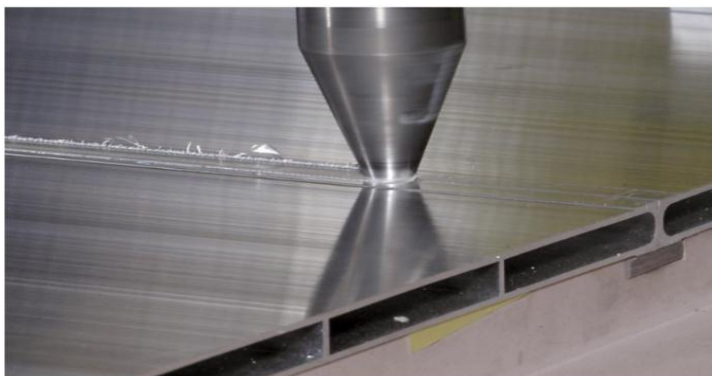


Figure II. 9 : Soudage par friction
(linéaire)

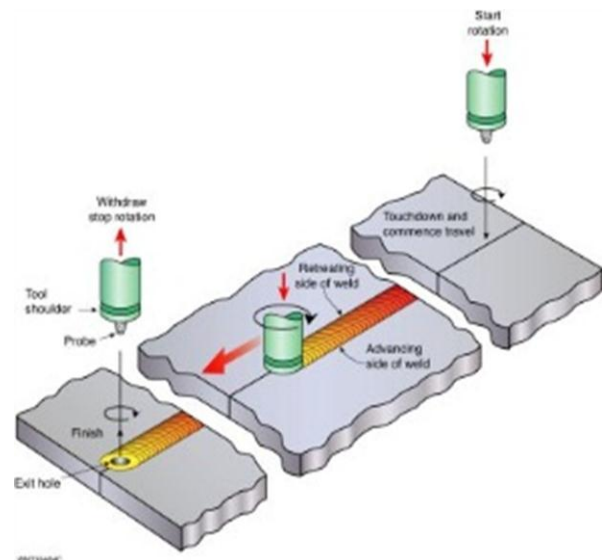
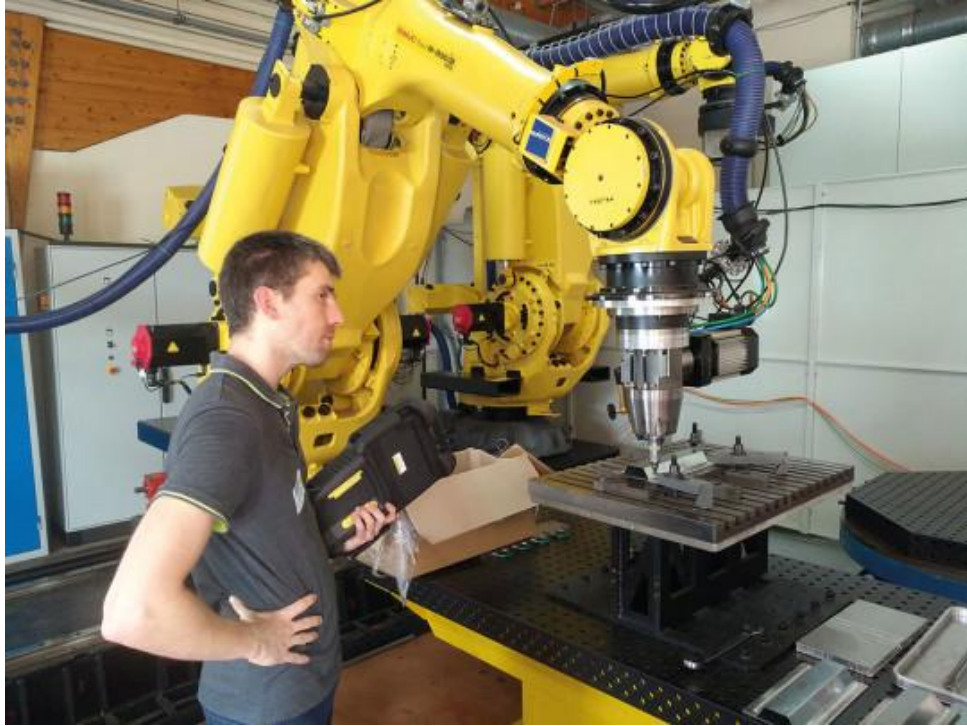


Figure II. 10: Soudage par friction
(rotatif)



- Soudage à l'état solide (diffusion, explosion, forgeage)

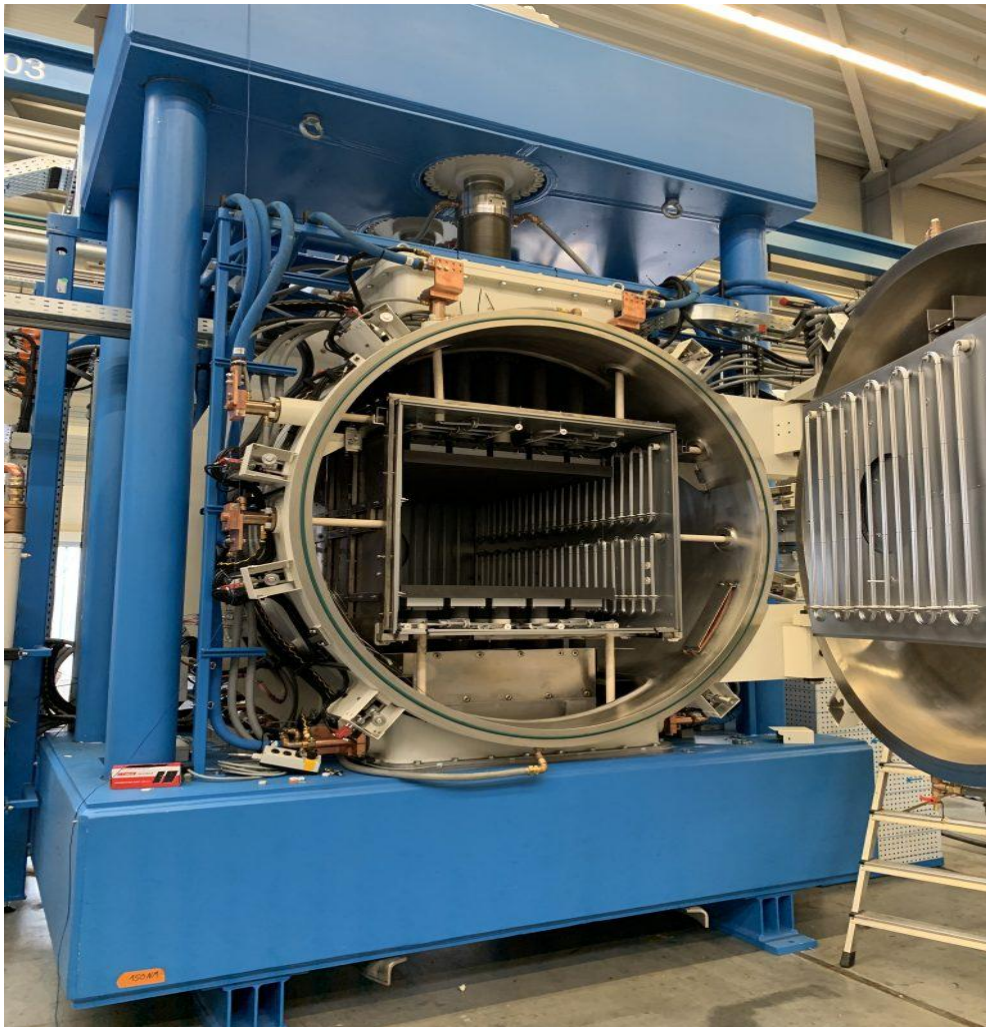


Figure II. 11: Resistance Heated High Vacuum Treatment Furnace With Integrated

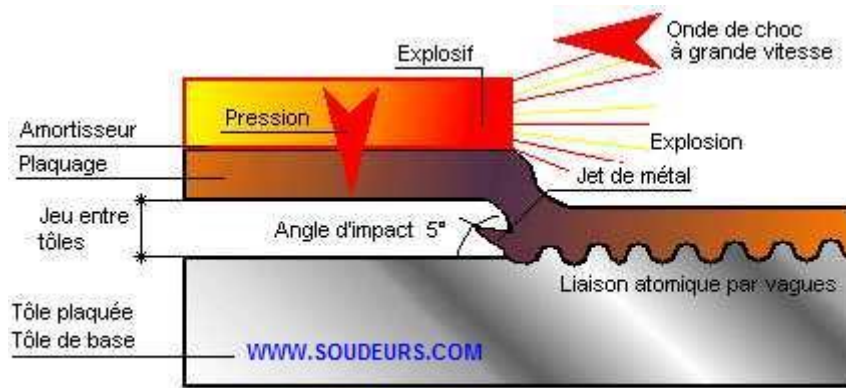


Figure II. 12 : Soudage à l'état solide (explosion)

B. Étapes typiques d'une opération de soudage :

1. **Préparation des pièces** : nettoyage, chanfreinage, ajustage
2. **Choix du procédé et des paramètres** : intensité, tension, gaz, électrodes
3. **Positionnement / bridage** des pièces à souder
4. **Réalisation de la soudure** : manuel, semi-automatique, ou automatisé
5. **Contrôle qualité** : visuel, radiographie, ultrasons, ressuage
6. **Finition** : meulage, polissage si nécessaire

II.1.2 .5. Domaine d'application :

le soudage manuel: le seul moyen possible pour réaliser des soudures dont l'accès est difficile ou de petite longueur.

le soudage semi-automatique: avancement automatique de l'électrode avec une torche (chauffage) tenue à la main. C'est celui qui est appliqué de manière générale .

le soudage automatique: la tête de soudage est montée, soit sur un chariot dont l'avancement est automatique, soit sur un robot de soudage. Il s'applique surtout aux soudures continues d'une certaine longueur.

II. 2. Procédé de soudage MIG-MAG :

II.2 .1. Définition :

On désigne également le soudage MIG/MAG comme le soudage à l'arc avec fil-électrode en atmosphère gazeuse. On fait la distinction entre le soudage à l'arc avec fil-électrode en atmosphère gazeuse inerte (MIG) et le soudage à l'arc avec fil-électrode en atmosphère gazeuse active (MAG). Actuellement, la méthode MIG/MAG est le procédé de soudage le plus couramment employé et offre la possibilité d'obtenir des vitesses de soudage extrêmement hautes. On peut l'utiliser de façon manuelle, mécanisée ou robotisée.[2]

III. 2.2. Principe du procédé :

Le procédé MIG (Metal inert Gas) ou MAG (Metal Active Gas) est un procédé de [soudage industriel](#) manuel, automatique ou robotique sous gaz de protection (inerte ou oxydant).

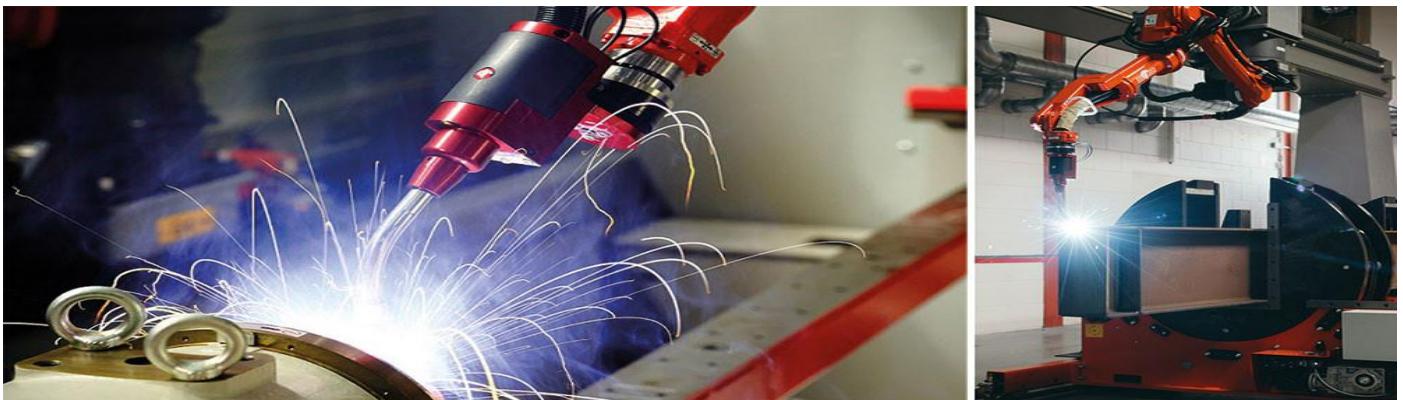


Figure III. 13 : SOUDAGE MIG/MAG AUTOMATISÉ SUR ROBOT PROCÉDÉS 131-135

Les techniques de soudage MIG et MAG sont chacune des méthodes de soudage semi-automatisées, automatisées ou robotisées. L'emploi d'une bobine de métal d'apport par le soudeur, également connue sous le nom d'électrode fusible ou fil de soudage, facilite la réalisation de soudures MIG/MAG en continu. Ces techniques autorisent une pénétration efficace et sont capables de souder des matériaux de différentes épaisseurs, allant de fines à importantes.

Sur les postes de soudage à l'arc MIG/MAG, plusieurs paramètres sont ajustables (tels que la vitesse du fil, le courant, la tension, etc.), et certains d'entre eux sont interdépendants. Les générateurs récents s'appuient sur des synergies : des méthodes de fonctionnement ajustées qui modifient les paramètres de manière précise et qui facilitent considérablement les opérations en réduisant, par exemple, les paramètres changeants tels que la vitesse du fil .[2]

- **Le type de gaz utiliser :**

Les procédés MIG et MAG n'utilisent pas le même type de gaz.

En effet, les soudures MIG requièrent un gaz inerte. Celui-ci ne réagit pas avec le métal fondu, et sert surtout à protéger le bain de fusion. Il s'agit majoritairement de l'argon, ou de mélanges argon/hélium, voire d'hélium pur. L'aspect de cordon de soudure MIG est un des paramètres critiques.

Le soudage MAG requiert généralement de l'argon comme gaz de base, mélangé à des gaz actifs (oxydants suivant NF EN ISO 14175) comme le CO_2 et/ou l' O_2 .

Les gaz oxydants vont en effet créer de façon limitée des oxydes en surface. Ces oxydes sont "émissifs": ils vont faciliter la sortie des électrons et donc contribuer à la stabilité de l'arc électrique. Toutefois, afin de limiter les niveaux d'oxydation du cordon, il convient de contrôler finement la teneur en éléments oxydants du gaz de protection.

Nous rencontrons ainsi:

- **Pour les aciers inoxydables:** des mélanges Ar- CO_2 ou Ar- O_2 à des teneurs inférieures à 2%. Il est indispensable ici de ne pas oxyder le chrome, élément crucial à la protection contre la corrosion.
- **Pour l'acier:** des mélanges Ar- CO_2 , Ar- O_2 , ou Ar- CO_2 - O_2 . Les teneurs en éléments oxydants peuvent atteindre jusqu'à 18%. Le pouvoir oxydant de l'oxygène est plus important que celui du CO_2 . L'oxygène a également un rôle tensioactif permettant un meilleur étalement du cordon (mouillage) et une plus faible viscosité du bain. Il en résulte une vitesse d'avance à plat plus importante mais une plus grande difficulté à manier le bain lors du soudage en position.

Pour le soudage en fil fourré, la teneur en éléments oxydants est critique. En effet ceux-ci vont directement contribuer aux pertes d'éléments d'alliage ajoutés dans le flux. Il convient donc de respecter les spécifications du métal d'apport. On trouve ainsi des gaz de la classe M20, M21 suivant l'ISO 14175 ou même du CO_2 pur. [2]

II.2.3. Avantages et inconvénients :

a) Les avantages de la soudure MIG-MAG :

Le procédé de soudure MIG-MAG offre de nombreux avantages, qui expliquent en partie sa popularité dans l'industrie. Voici les principaux.

- **Rapidité d'exécution**

La soudure MIG-MAG permet de réaliser des soudures très rapidement. En effet, le fil électrode se déroule automatiquement et la fusion se fait instantanément sous l'effet de l'arc électrique. De plus, il est possible de souder des pièces de grande taille en une seule passe, ce qui permet de gagner du temps.

- **Productivité accrue**

La rapidité d'exécution de la soudure MIG-MAG permet d'[augmenter la productivité de l'atelier](#). En effet, il est possible de souder plusieurs pièces en un temps record, ce qui réduit les temps d'attente entre les différentes opérations de soudure.

- **Qualité de la soudure**

La soudure MIG-MAG produit des soudures de qualité, avec une bonne pénétration et une faible déformation de la pièce. De plus, le procédé permet d'obtenir des cordons de soudure réguliers et esthétiques.

- **Adaptabilité à différents métaux**

La soudure MIG-MAG est très polyvalente et peut être utilisée pour souder différents métaux, tels que l'acier, l'aluminium, le cuivre, le laiton et même l'inox. Il suffit de choisir le gaz de protection et le fil électrode adapté à chaque matériau.

- **Faible taux de rejets**

La soudure MIG-MAG produit très peu de fumées et de projections, ce qui limite les rejets et améliore les conditions de travail dans l'[entreprise de production industrielle](#). De plus, le taux de rejets est généralement faible, ce qui permet de limiter les pertes de matériau et de réduire les coûts de production.

b) Les inconvénients de la soudure MIG-MAG :

Maintenant que nous avons passé en revue les avantages de la soudure MIG-MAG, il est temps de se pencher sur ses inconvénients potentiels.

- **Sensibilité aux conditions externes**

Le procédé MIG-MAG est sensible aux conditions externes telles que les courants d'air, la poussière et les particules qui peuvent affecter la qualité du soudage. Il est donc important de travailler dans un environnement propre et stable pour garantir la qualité des soudures.

- **Coût initial élevé**

Le coût initial pour l'achat d'un équipement de soudage MIG-MAG peut être élevé, surtout si vous optez pour des modèles de haute qualité ou pour des équipements à technologie avancée. Cependant, à long terme, la soudure MIG-MAG peut être plus rentable que d'autres procédés de soudage en raison de sa vitesse et de sa productivité élevée.

- **Limites de positionnement**

La soudure MIG-MAG peut être difficile à utiliser dans certaines positions, telles que les positions verticales et *overhead*. Cela peut limiter la capacité d'un soudeur à effectuer des soudures dans des positions complexes.

- **Nettoyage et préparation de la surface**

Le MIG-MAG nécessite une préparation minutieuse de la surface de soudure avant le soudage. Les surfaces doivent être nettoyées de manière appropriée pour éviter les contaminations et garantir une adhérence correcte.

II. 2.4. Domaines d'application :

La soudure MIG-MAG est utilisée dans une variété d'applications industrielles et de fabrication, notamment dans les industries automobiles, aérospatiales, de la construction navale, de la fabrication de structures métalliques et bien d'autres.

- **Dans l'industrie automobile:** le soudage MIG-MAG est largement utilisé pour l'assemblage de carrosseries de voitures et de camions. La méthode permet une soudure rapide et précise de tôles minces et de structures complexes en acier, aluminium et alliages légers. Elle est également utilisée pour la fabrication de composants tels que les cadres de siège et les suspensions ;
- **Dans l'industrie aérospatiale:** cette technique est utilisée pour la fabrication de pièces en aluminium et en alliages de titane, telles que les conduits d'air, les collecteurs d'admission et les supports de moteur ;
- **Dans la construction navale:** la soudure MIG-MAG est utilisée pour l'assemblage de coques et de superstructures en acier, aluminium et alliages de cuivre-nickel. Les avantages de cette méthode sont la vitesse de soudage, la productivité et la qualité des soudures ;
- **Dans la fabrication de structures métalliques:** la soudure MIG-MAG est utilisée pour l'assemblage de poutres en acier, de cadres et de structures complexes en acier. Elle permet un assemblage rapide et efficace de grandes pièces avec une haute qualité de soudage. [3]

CHAPITRE III.

PROCEDE DU SOUDAGE SOUS

ATMOSPHERE CONTROLEE

CHAPITRE III. PROCEDE DU SOUDAGE SOUS ATMOSPHERE CONTROLEE

I. 1. Définition :

Pour certains travaux de soudure, contrôler l'atmosphère est un élément crucial pour réussir. Le soudage en atmosphère contrôlée est justement fait pour cela : il permet de fermer des sous-ensembles, tout en maîtrisant la pression ou le vide de la pièce que l'on va sceller !

L'atmosphère contrôlée se réfère à la pratique de créer un vide dans une chambre scellée ou d'y enfermer un gaz sous pression (inférieure ou égale à 1 bar relatifs). L'utilisation de gaz inertes tels que l'hélium ou l'azote permet d'obtenir une atmosphère désirée, exempte de particules ou de molécules d'oxygène.

En surveillant la pression du gaz dans un espace pendant une procédure de soudage, on peut prévenir toute contamination !

Il est conseillé d'utiliser le soudage en atmosphère contrôlée pour la fabrication de certains appareils électroniques. C'est le cas, par exemple, pour les implants actifs ou les détecteurs électroniques !

Effectivement, le fait d'être étanche ne suffit pas pour prolonger la longévité des pièces. Il est donc nécessaire de protéger les composants électroniques délicats contre toute attaque.[4]



Figure III . 14: à atmosphère contrôlée pour soudage laser

III. 2. Principe du procédés :

1. Création de l'arc électrique :

Un arc électrique est produit entre l'électrode (qui peut être non consommable, comme dans le TIG, ou fusible, comme dans le MIG/MAG) et la pièce à souder. Cette arc génère une chaleur extrême (qui peut excéder 3 000 °C) capable de faire fondre localement le métal, créant ainsi un bain de fusion.

2. Injection du gaz de protection :

La torche de soudage diffuse un gaz de protection autour de l'arc et du bassin de fusion. Il est possible que ce gaz soit :

- **Inerte (par exemple : argon, hélium)** : il n'y a pas de réaction chimique avec le métal.
- **Actif (par exemple : CO₂, mélanges argon-CO₂)** : il peut avoir un impact sur la migration du métal et l'infiltration.

Ce gaz crée une atmosphère de protection qui élimine l'oxygène, l'azote et la vapeur d'eau présents dans l'air, ce qui permet d'éviter :

- l'oxydation du métal en fusion,
- la création de porosités ou de soufflures,
- les imperfections lors du soudage.

3. Fusion et liaison des métaux :

Le métal d'apport (s'il y en a) et le métal de base fondent ensemble, puis **se solidifient en se refroidissant**, créant une liaison **métallurgique forte** et durable entre les deux pièces.

4. Refroidissement sous protection :

Pendant la solidification, le gaz continue de protéger le cordon de soudure jusqu'à ce qu'il soit suffisamment refroidi, pour éviter toute contamination postérieure.

III.3. Avantages et inconvénients.

➤ **Avantages :**

1. **Haute qualité de soudure :**

- Très peu de défauts (porosités, inclusions, oxydation).
- Cordon propre et précis, idéal pour les soudures visibles ou techniques.

2. **Excellente protection du bain de fusion :**

- Le gaz protège efficacement le métal fondu de l'air, évitant les réactions chimiques indésirables.

3. **Polyvalence :**

- Adapté à de nombreux métaux (acier, inox, aluminium, titane, etc.).

4. **Automatisable :**

- Les procédés comme MIG/MAG sont faciles à automatiser pour la production en série.

5. **Moins de nettoyage post-soudage :**

- Pas de laitier à enlever (contrairement au soudage à l'électrode enrobée).

6. **Bonne pénétration et fusion :**

- Résistances mécaniques fiables, y compris dans des environnements exigeants.

➤ **Inconvénients :**

1. **Coût plus élevé :**

- Gaz de protection coûteux (surtout argon/hélium).
- Équipement plus sophistiqué et plus cher.

2. **Sensibilité aux conditions extérieures :**

- Courants d'air ou environnement extérieur perturbent la protection gazeuse (surtout en TIG).

3. **Nécessite une bonne maîtrise :**

- Le soudage TIG, en particulier, demande une formation technique et une bonne coordination.

4. **Moins adapté aux environnements sales ou rouillés :**

- Le métal doit être bien préparé (propre et dégraissé) pour garantir une bonne qualité de soudure.

5. **Risque d'exposition aux fumées ou gaz inertes :**

- En espace confiné, mauvaise ventilation = danger d'asphyxie ou d'inhalation de fumées métalliques.

III.4. Domaines d'application :

Le soudage sous atmosphère contrôlée est largement utilisé dans les secteurs où la **qualité, la précision et la fiabilité** des soudures sont essentielles. On le retrouve dans les domaines suivants :

1. Industrie automobile

- Assemblage de châssis, carrosseries, pots d'échappement.
- Soudage MIG/MAG automatisé sur lignes de production.

2. Aéronautique et aérospatial

- Soudures de haute précision sur aluminium, titane ou inox.
- Procédés TIG et plasma pour structures légères et résistantes.

3. Construction métallique et chaudronnerie

- Réservoirs, charpentes métalliques, pipelines.
- MIG/MAG très utilisé pour ses performances en production.

4. Électronique et microtechnique

- Soudage de composants fins et sensibles.
- TIG et micro-plasma adaptés aux faibles épaisseurs.

5. Biomédical

- Fabrication d'implants, instruments chirurgicaux en inox ou titane.
- Exigences de propreté et de qualité très strictes (procédé TIG).

6. Naval et offshore

- Soudures résistantes à la corrosion (inox, alliages).
- Atmosphère contrôlée essentielle pour les environnements humides et salins.

7. Énergies renouvelables

- Éolien, solaire, hydrogène : structures, réservoirs sous pression.
- Procédés sans scories, adaptés aux normes environnementales.

CHAPITRE IV.

PROCEDE DU SOUDAGE DES

POLYMERES :

CHAPITRE IV. PROCEDE DU SOUDAGE DES POLYMERES :

IV.1. Définition :

Le soudage des polymères est un procédé d'assemblage utilisé principalement pour unir des matériaux thermoplastiques. Contrairement aux métaux, les polymères ne fondent pas selon un point unique, mais ramollissent progressivement dans une plage de températures spécifique. Cela permet d'utiliser des procédés thermiques ou mécaniques pour créer une liaison entre deux surfaces compatibles sans recourir à des fixations mécaniques ou à des adhésifs.

Sur le plan physique, le soudage des polymères repose sur le **ramollissement localisé** des surfaces en contact, suivi d'un **apport de pression** permettant l'**interpénétration moléculaire** des chaînes polymères. Après refroidissement, une **liaison cohésive** est formée, conférant au joint une solidité comparable à celle du matériau d'origine.



Les principales méthodes de soudage des polymères incluent :

- le soudage par plaque chauffante,
- le soudage par ultrasons,
- le soudage par friction,
- le soudage laser, entre autres.

Chaque procédé est adapté à des contraintes spécifiques : géométrie des pièces, type de polymère, exigences de solidité ou d'étanchéité.

Figure IV. 15 : Procédé de soudage des tuyaux en polyéthylène

Le soudage des polymères joue un rôle crucial dans de nombreux secteurs industriels tels que l'automobile, l'électronique, le médical, l'emballage ou encore l'aéronautique, grâce à sa capacité à former des assemblages solides, légers et étanches.[5]

IV.2. Principe du procédés :

Principaux procédés de soudage des polymères

1. **Soudage par plaque chauffante** : Deux pièces sont pressées contre une surface chauffée jusqu'à fusion, puis assemblées après retrait de la plaque.
2. **Soudage par impulsion de chaleur** : Une impulsion thermique est appliquée à une des pièces, suivie d'un refroidissement sous pression.
3. **Soudage par ultrasons** : Des vibrations haute fréquence génèrent de la chaleur à l'interface des pièces, entraînant leur fusion .
4. **Soudage par friction** : La chaleur est produite par la friction entre les pièces, suivie d'une pression pour assurer la fusion .
5. **Soudage laser** : Un faisceau laser fusionne localement les surfaces des pièces, offrant une grande précision et une faible contrainte résiduelle .

IV.3. Avantages et inconvénients :

Le soudage des polymères offre divers avantages et inconvénients qui influencent leur utilisation dans l'industrie.

➤ **Avantages :**

1. **Assemblage sans matériaux d'apport** : Le soudage des polymères permet d'unir les pièces sans utiliser de métaux d'apport, de flux ou de gaz de protection, ce qui simplifie le processus et réduit les coûts associés.
2. **Joints solides et durables** : Les soudures réalisées sont robustes et présentent une résistance mécanique élevée, comparable à celle des matériaux de base.
3. **Processus rapide et automatisable** : De nombreuses méthodes de soudage des polymères, comme le soudage par ultrasons, offrent des vitesses d'assemblage élevées et peuvent être facilement automatisées, augmentant ainsi l'efficacité de production.
4. **Flexibilité dans les conceptions** : Ces procédés permettent de souder des pièces de formes complexes et de tailles variées, offrant une grande liberté de conception.
5. **Respect des normes d'hygiène** : Le soudage des polymères est essentiel dans les secteurs médical et alimentaire, car il garantit l'intégrité et la sécurité des produits sans contamination par des adhésifs ou d'autres matériaux d'apport.

➤ **Inconvénients :**

1. **Investissement initial élevé :** L'acquisition d'équipements spécialisés pour le soudage des polymères peut représenter un coût important, ce qui peut constituer une barrière pour certaines entreprises.
2. **Limitations de taille et de forme :** Certaines méthodes, comme le soudage par rotation, sont principalement adaptées aux pièces circulaires ou cylindriques et peuvent ne pas convenir pour des géométries plus complexes.
3. **Exigences de conception spécifiques :** Pour optimiser les résultats, les pièces à souder doivent être conçues en tenant compte des spécificités du procédé choisi, ce qui peut nécessiter une expertise supplémentaire.
4. **Sensibilité à l'épaisseur et à la dureté :** Certaines techniques, comme le soudage par ultrasons, peuvent rencontrer des difficultés avec des pièces plus épaisses ou plus dures, nécessitant des ajustements dans le processus ou des équipements plus puissants. [5]

IV.4. Domaines d'application :

Le soudage des polymères, notamment par laser, est utilisé dans divers secteurs industriels grâce à sa précision et à sa capacité à créer des assemblages solides sans matériaux d'apport. Voici un aperçu des principaux domaines d'application :

- **Secteur médical**

Le soudage laser est couramment employé pour assembler des dispositifs médicaux tels que des poches, des capteurs, des boîtiers et des instruments chirurgicaux. Cette technologie permet de réaliser des assemblages hermétiques, essentiels pour garantir la stérilité et la sécurité des produits médicaux. Elle est également utilisée dans la microfluidique et l'encapsulation électronique, offrant des solutions adaptées aux exigences strictes de ce secteur.

- **Industrie automobile**

Dans l'automobile, le soudage laser est utilisé pour assembler des composants tels que des garnitures intérieures, des boîtiers fluidiques, des systèmes d'éclairage et des structures multicouches. Cette méthode offre des avantages tels que l'absence d'utilisation de colle, une réduction des temps de cycle et une soudure invisible, contribuant ainsi à améliorer la qualité et l'efficacité de la production.

- **Aéronautique**

Le soudage des polymères est également appliqué dans la fabrication de structures aéronautiques en composite. Il permet de concevoir et de fabriquer des pièces complexes de grandes dimensions, adaptées aux exigences spécifiques de ce secteur. Par exemple, une machine robotisée unique au monde a été développée pour assembler des structures aéronautiques et des lanceurs spatiaux.

- **Emballage et cosmétique**

Dans l'industrie de l'emballage, le soudage laser est utilisé pour assembler des contenants, des films et des emballages, offrant des solutions d'assemblage propres et efficaces. Il est également employé dans la fabrication de flacons, de bouchons et de boîtiers dans le secteur du luxe, garantissant des produits de haute qualité.

- **Électronique**

Le soudage au laser est utilisé pour assembler des boîtiers électroniques, assurant une étanchéité et une protection optimales des composants internes. Il est également appliqué dans la fabrication de puces d'analyse et d'autres dispositifs électroniques nécessitant des assemblages précis et fiables.

- **Recherche et développement**

Le soudage des polymères est également utilisé dans des applications de recherche et développement, notamment dans le domaine des composites thermoplastiques. Des techniques telles que le soudage par induction, par résistance, par vibrations, par laser et par ultrasons sont explorées pour étendre les possibilités d'assemblage de ces matériaux. [5]

CHAPITRE V.

CALCUL DES CORDONS DE SOUDURE:

CHAPITRE V. CALCUL DES CORDONS DE SOUDURE

V.1. Introduction (théorie) :

Les **cordons de soudure** assurent l'assemblage de deux ou plusieurs pièces métalliques par fusion. Pour garantir la **solidité** et la **sécurité** d'une structure soudée, il est essentiel de **dimensionner correctement les soudures**, c'est-à-dire de vérifier qu'elles résistent aux efforts mécaniques auxquels elles seront soumises.

Le **calcul des cordons de soudure** permet de :

- Vérifier la **résistance** des soudures face aux contraintes mécaniques (traction, cisaillement, flexion...),
- **Déterminer les dimensions** minimales des soudures nécessaires (gorge, longueur, section),
- Garantir la **conformité aux normes** (ex : EN 1993-1-8 pour les structures métalliques selon l'Eurocode 3, ou l'ASME, AWS pour d'autres contextes). [6]

➤ Types de cordons de soudure :

Les types les plus courants sont :

- **Soudure d'angle** (fillet weld),
- **Soudure bout à bout** (butt weld),
- **Soudure en recouvrement** (lap joint),
- **Soudure sur chanfrein** (bevel or V weld).

➤ Principes de calcul :

Le calcul repose sur :

- La **géométrie de la soudure** (longueur, épaisseur de gorge),
- La **nature des efforts** (effort normal, cisaillement, moment),
- Le **type d'acier** utilisé,
- Le **facteur de sécurité** prescrit par les normes.

La **résistance d'une soudure** est généralement évaluée à l'aide des **contraintes admissibles** (méthode admissible) ou via les **contraintes de calcul** (méthode des états limites).

V.2. Calcul des cordons de soudure frontaux :

1. Définition :

Une **soudure frontale** (ou **soudure bout à bout**) est réalisée **dans le plan des pièces à assembler**, généralement **sur chant**, avec ou sans chanfrein. Ce type de soudure est utilisé quand la continuité mécanique ou esthétique est recherchée. [7]

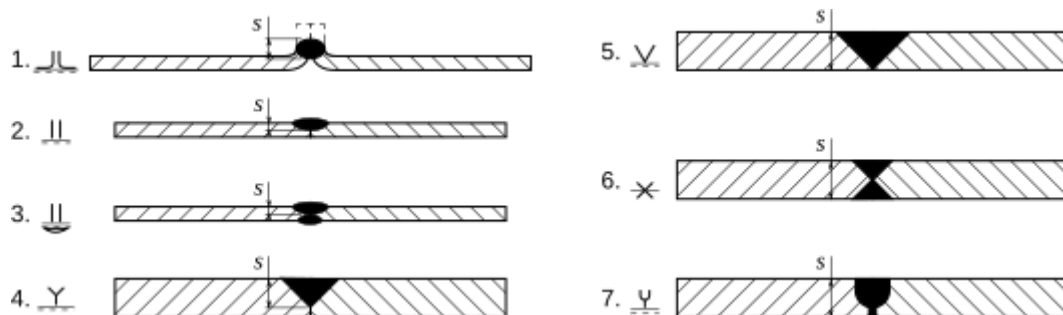


Figure V. 16 : Symboles élémentaire soudure bout a bout

Elle est souvent considérée comme **équivalente au matériau de base**, si elle est bien réalisée et contrôlée.

2. Hypothèses de calcul

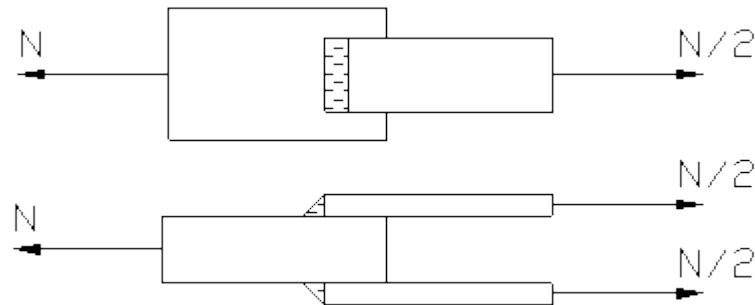
Selon l'**Eurocode 3** (EN 1993-1-8 : 2005 + A1 : 2014), pour les **soudages par fusion** :

- Les **soudages bout à bout** de bonne qualité peuvent être supposés avoir une **résistance égale** ou supérieure à celle du métal de base.
- Aucune **réduction de résistance** n'est nécessaire si la soudure est **pleine pénétration** et correctement réalisée. [7]

v.2. Calcul des cordons de soudure frontaux :

la formule fondamentale s'écrit alors:

$$k\sqrt{2} \frac{N}{\sum a l} \leq \sigma_e$$

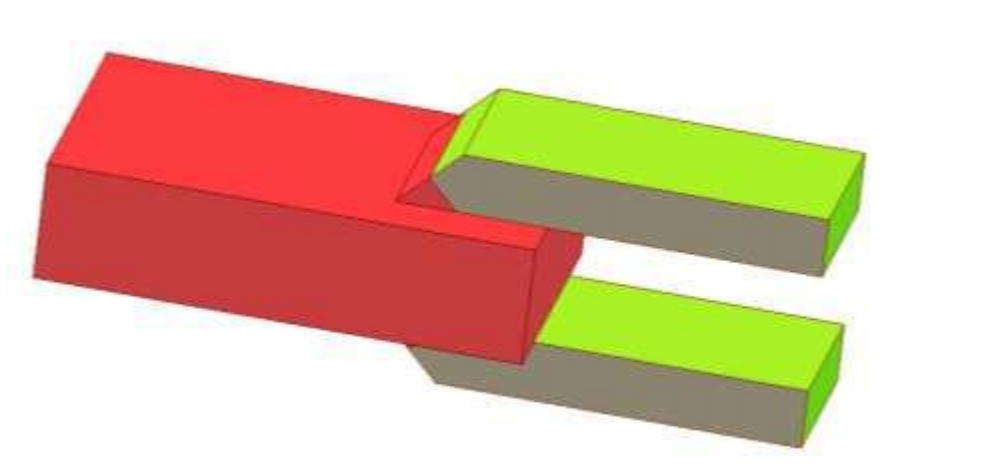


$$N_n = N \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow \sigma = \frac{N_n}{2la} = \frac{N\sqrt{2}}{4la}$$

$$N_{\perp} = N \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow \tau_{\perp} = \frac{N_{\perp}}{2la} = \frac{N\sqrt{2}}{4la}$$

$$N_{\parallel} = 0 \Rightarrow \tau_{\parallel} = 0$$

➤ Calcul des cordons d'angle frontaux:



si la soudure d'angle frontale est soumise à une force f on a : [7]

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{\sigma_{\perp}}}{a L} = \frac{F \cos 45^{\circ}}{a L} = \frac{F \sqrt{2}}{2 a L}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F_{\tau_{\perp}}}{a L} = \frac{F \cos 45^{\circ}}{a L} = \frac{F \sqrt{2}}{2 a L}$$

$$\tau_{//} = \frac{F_{\tau_{//}}}{a L} = 0 \text{ car il n'y a pas de composante selon la longueur de la gorge}$$

d'où :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2} = \sqrt{\left(\frac{F \sqrt{2}}{2 a L}\right)^2 + 3 \left(\frac{F \sqrt{2}}{2 a L}\right)^2} = \frac{F \sqrt{2}}{a L}$$

on doit vérifier que :

$$\sigma_{eq} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \quad \text{et} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

donc :

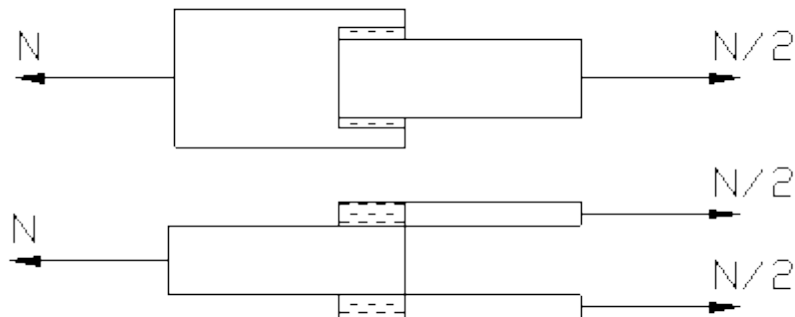
$$\sigma_{eq} = \frac{F \sqrt{2}}{a L} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \Rightarrow a L \geq \beta_w \gamma_{Mw} \frac{F \sqrt{2}}{f_u} \quad (1)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F \sqrt{2}}{2 a L} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} \Rightarrow a L \geq \gamma_{Mw} \frac{F \sqrt{2}}{2 f_u} \quad (2)$$

la formule 1 étant la plus défavorable la condition devient :

$$a L \geq \beta_w \gamma_{Mw} \frac{F \sqrt{2}}{f_u}$$

V.3. Calcul des cordons de soudure latéraux :

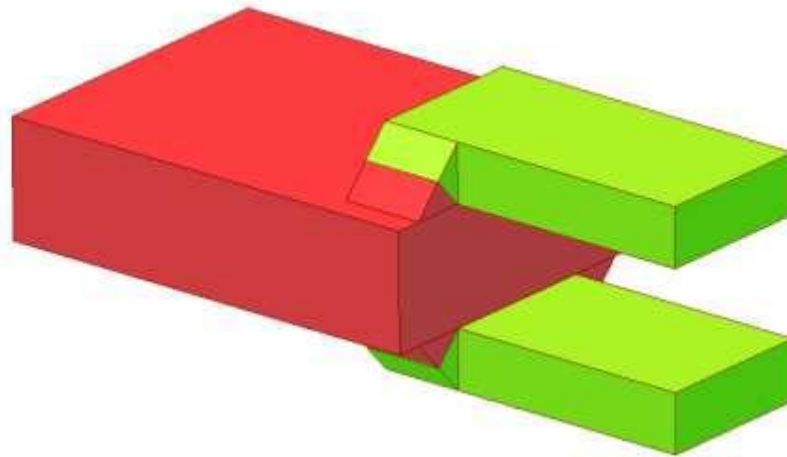


$$\sigma = \tau_{\perp} = 0$$

$$\tau_{//} = \frac{N}{2al}$$

$$k\sqrt{3} \frac{N}{\sum al} \leq \sigma_e$$

➤ Calcul des cordons d'angle latéraux:



on a :

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{\sigma_{\perp}}}{a L} = 0 \quad \text{car il n'y a pas de composante perpendiculaire au cordon}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F_{\tau_{\perp}}}{a L} = 0 \quad \text{car il n'y a pas de composante perpendiculaire au cordon}$$

$$\tau_{//} = \frac{F_{\tau_{//}}}{a L} = \frac{F}{a L}$$

d'où

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3 \tau_{//}^2} = \frac{F \sqrt{3}}{a L}$$

on doit vérifier que :

$$\sigma_{eq} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \quad \text{et} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} \quad (\text{ici sans objet})$$

soit :

$$\sigma_{eq} = \frac{F \sqrt{3}}{a L} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \Rightarrow a L \geq \beta_w \gamma_{Mw} \frac{F \sqrt{3}}{f_u}$$

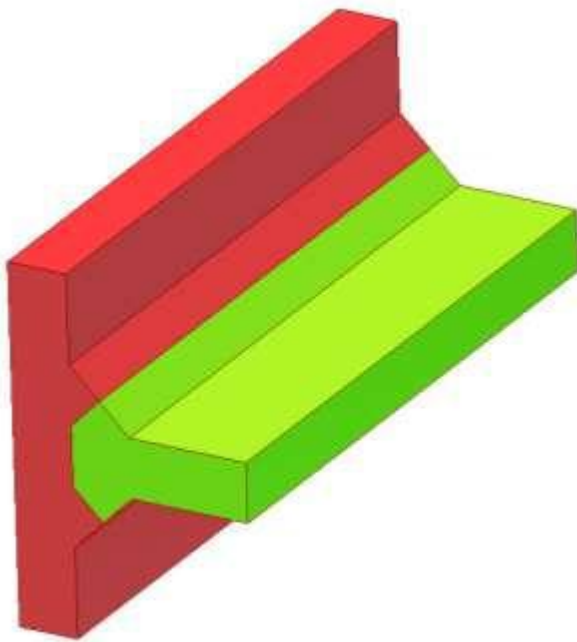
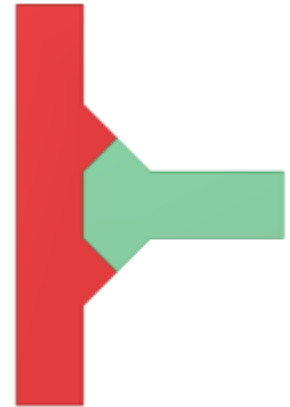
la condition devient alors :

$$a L \geq \beta_w \gamma_{Mw} \frac{F \sqrt{3}}{f_u}$$

V.4. Calcul des cordons de soudure obliques :

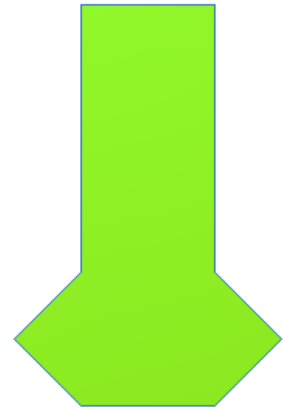
L'effort **N** est dans le plan horizontal exercé sur la pièce jaune.

La face arrière de la pièce rouge est encastrée



La pièce jaune est en équilibre, on peut lui appliquer le Principe Fondamental de la Statique en A. On détermine la force moyenne transmissible par la facette (section efficace) en son centre de gravité G. La projection de cette force dans le repère $\mathbf{R} (\vec{1} \quad \vec{1} \quad \vec{n})$ permet de déterminer $\tau_{\perp}, \tau_{\parallel}, \sigma_{\perp}$. [7]

On isole la pièce jaune qui est en équilibre. [7]



▷ **Cordons obliques**

$$\sigma = \tau_{\perp} = \frac{N \sin \alpha}{\sqrt{2} a \Sigma \ell} \quad \tau_{\perp} = \frac{N \cos \alpha}{a \Sigma \ell}$$

CHAPITRE VI. DEFAUTS DES ASSEMBLAGES PAR SOUDAGE :

CHAPITRE VI. DEFANTS DES ASSEMBLAGES PAR SOUDAGE

VI.1. Introduction.

Utilisées en grande série comme en fabrication unitaire, les structures mécano-soudées sont le résultat du soudage d'éléments préfabriqués (tôles, profilés, tubes ...). Lors de la réalisation des châssis mécano-soudés par soudure, des défauts (fissures, soufflures ...) et des déformations de pièces sont susceptibles d'apparaître ; il est possible de prévenir ou de corriger ces défauts et déformations. Réaliser une soudure quelque soit la technologie employée, n'est pas sans risques ; des moyens de prévention sont mis en place pour le faire en sécurité.



Figure VI. 17 : Soudeur équipé

Cette ressource expose les différents types de défauts et de déformations de soudage, ainsi que les risques liés à l'utilisation de ce procédé. Les deux ressources précédentes « *Technique de réalisation de châssis mécano-soudés : la soudure* » et « *Conception et réalisation de châssis mécano-soudés* » présentent les matériaux utilisés et les procédés de soudage, puis les différentes soudures sont décrites et les calculs liés à la conception de châssis mécano-soudés sont exposés. [8]

VI.2. Les principaux défauts de soudure :

1 – Les défauts de soudage

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Sont exposés dans cette ressource les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé. Ce sont :

- Les fissures,
- Les soufflures,
- La pollution ferreuse,
- Les inclusions,
- Les retassures et criques de solidification.

1.1 - Les fissures

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

- Dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
- Dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure :

- La fissuration à chaud,
- La fissuration à froid.

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore).



Figure VI. 18: Exemples de fissures sur aluminium

1.2 - Les soufflures

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Des soufflures débouchantes sont appelées piqûres.

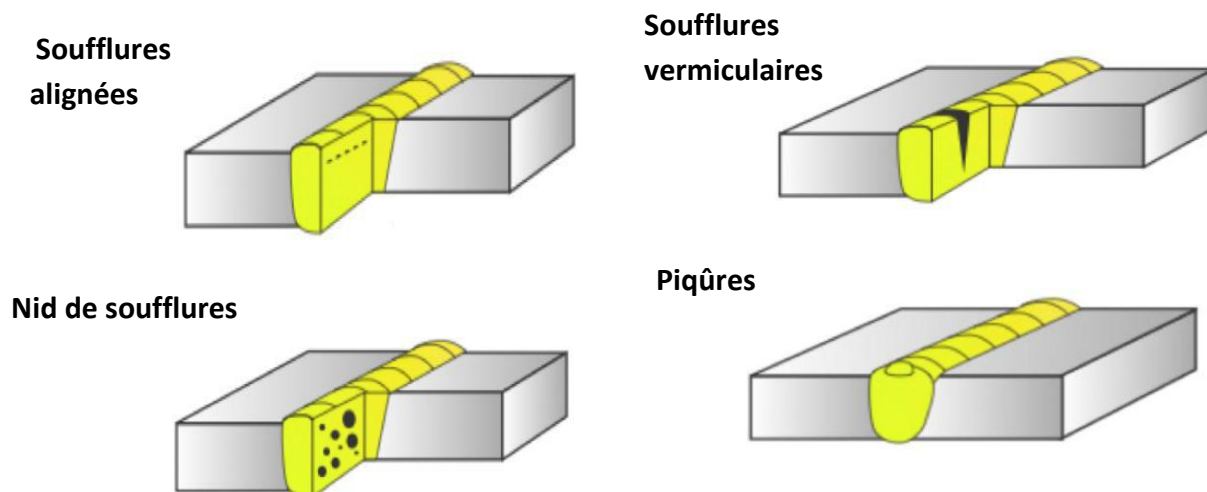


Figure VI. 19 : Les différents types de soufflure

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour les prévenir, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures.

Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base. [9]

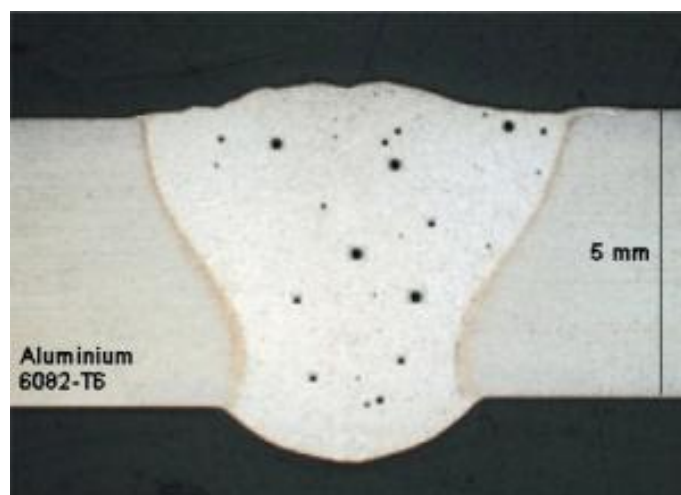


Figure VI. 20: Exemple de soufflures

1.3 La pollution ferreuse

La pollution ferreuse est une corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche superficielle. Elle résulte généralement de l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable (brosse ou autres) pendant l'usinage, la mise en forme ou le nettoyage.

Dans d'autres cas, elle survient en conséquence des projections de métal fondu lors des opérations de soudage. [9]

1.4 - Les retassures et criques de solidification

Comme en fonderie (voir ressource « *Le moulage en coquille par gravité : règles de tracé* »), à la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon.

Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope.

1.5 - Les inclusions

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger. Il existe différents types d'inclusion :

- Inclusion solide (poussières),
- Inclusion de laitier,
- Inclusion de flux,
- Inclusion d'oxyde métallique,
- Inclusion métallique (électrode).

VI.3. Les inclusions gazeuses :

3.1 Définition:

Les **inclusions gazeuses** sont des **bulles de gaz emprisonnées** dans le métal fondu lors du refroidissement. Elles apparaissent sous forme de **petites cavités sphériques** visibles à l'œil nu ou par contrôle non destructif (radiographie, ultrasons...).

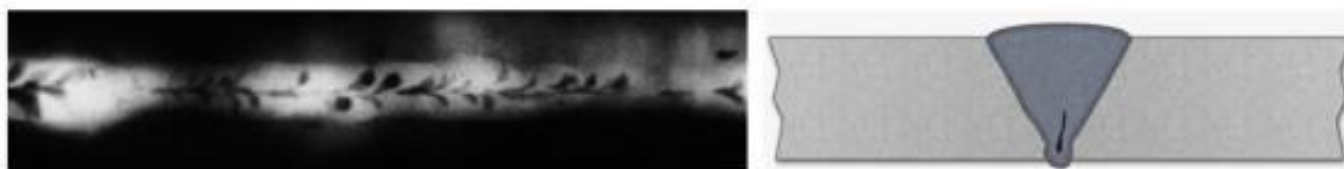


Figure VI. 21 : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires

3.2 Origine des gaz :

Les gaz peuvent provenir de :

- l'humidité dans les pièces ou les électrodes (hydrogène),
- une mauvaise protection gazeuse (arc électrique ou TIG),
- des contaminants sur les surfaces (huile, rouille, peinture),
- des réactions chimiques dans le bain de fusion (ex. : décomposition d'oxydes).

3.3 Types d'inclusions gazeuses:

Type	Description
Soufflures dispersées	Bulles nombreuses mais petites, réparties irrégulièrement
Soufflure unique	Grosse bulle isolée dans le cordon
Soufflures alignées	Petites bulles alignées le long de la soudure
Canaux gazeux	Bulles connectées formant un canal

Tableau IV.1 : Types d'inclusions gazeuses

3.4 Conséquences sur la soudure :

- Baisse de la **résistance mécanique**
- **Fragilité** à la rupture ou à la fatigue
- **Fuites** dans les assemblages étanches
- **Non-conformité** aux normes qualité

3.5 Causes principales:

- Électrode ou fil fourré humide
- Métal de base sale ou mal préparé
- Débit de gaz de protection mal réglé (TIG, MIG)
- Vent ou courants d'air pendant le soudage
- Vitesse de soudage trop élevée

3.6 Prévention des inclusions gazeuses :

- Bien **sécher** les électrodes (four à 250–350°C si nécessaire)
- Nettoyer soigneusement les pièces avant soudage (dégraissage, brossage)
- Protéger la zone de soudage des courants d'air
- Réglage optimal du gaz de protection
- Respect des paramètres de soudage (vitesse, intensité, tension)

3.7 Détection des porosités :

- **Examen visuel** (si proche de la surface)
- **Radiographie industrielle (RT)** : très efficace
- **Contrôle par ultrasons (UT)** : détection volumique
- **Norme associée** : **ISO 6520-1** (*Classification des imperfections de soudage*)

VI.4. Les inclusions solides :

4.1 Définition :

Les **inclusions solides** sont des **particules étrangères non métalliques** (souvent des scories ou des oxydes) **piégées dans le métal de soudure** pendant le refroidissement du bain de fusion. Elles **interrompent la continuité du métal soudé**, affectant sa résistance mécanique et sa qualité. [10]

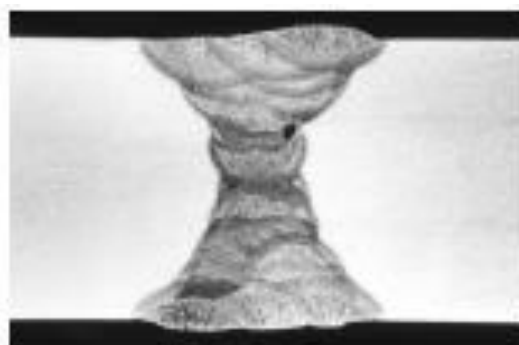


Figure VI. 22 : : Inclusions de laitier

4.2 Types d'inclusions solides :

Type	Description
Inclusion de scorie	Résidu de flux ou laitier piégé entre les passes
Inclusion d'oxyde	Oxydes d'aluminium, de fer ou de silice dans la zone fondue
Inclusion métallique	Fragment de métal étranger piégé dans le cordon

Tableau IV.2 : Types d'inclusions solides

4.3 Conséquences sur la soudure :

- **Fragilisation mécanique** du joint
- Point de **concentration de contraintes** → fissures possibles
- **Rejets** au contrôle qualité (ISO 5817, EN 1011)
- Défauts **d'apparence** ou **d'étanchéité** dans certains cas[11]

4.4 Causes principales :

- Mauvais **nettoyage entre les passes de soudure**
- **Flux non évacué** dans les procédés avec laitier (ex. : soudage à l'arc avec électrode enrobée ou fil fourré)
- Mauvais **positionnement de la torche**
- Température trop basse → mauvaise fusion du laitier
- Vitesse de soudage trop élevée → piégeage de scories[11]

4.5 Prévention des inclusions solides :

- Nettoyer soigneusement le **cordons entre chaque passe** (brossage, meulage)
- Utiliser des **électrodes et flux de bonne qualité**
- Contrôler les **paramètres de soudage** (intensité, tension, vitesse)
- S'assurer d'une **bonne protection gazeuse** (TIG, MIG)
- Former les opérateurs à la bonne manipulation du matériel

4.6 Méthodes de détection :

- **Contrôle radiographique (RT)** : très efficace pour détecter les inclusions internes
- **Contrôle par ultrasons (UT)** : détecte les discontinuités volumétriques
- **Examen visuel ou macroscopique** : parfois possible en cas de défauts visibles en surface

VI.5. Défauts de fusion :

1. Définition:

Un **défaut de fusion** correspond à une **absence de liaison métallurgique** entre :

- le **métal de base** et le **métal d'apport**, ou
- **deux passes de soudure successives**.

Cela signifie que le métal n'a pas suffisamment **fondue ou fusionné**, ce qui crée une discontinuité invisible mais **dangereuse pour la solidité du joint**.

2. Types de défauts de fusion:

Type	Description
Manque de fusion latéral	Le métal d'apport ne fusionne pas correctement avec le bord de la pièce
Manque de fusion interpass	Mauvaise fusion entre deux couches de soudure
Manque de fusion au fond du joint	Appelé aussi manque de pénétration : la racine n'est pas atteinte

Tableau IV.3 : Types de défauts de fusion

3. Conséquences sur la soudure:

- **Perte de résistance mécanique** → rupture possible sous charge
- Risque de **fissuration à la fatigue**
- Défaut **d'étanchéité**
- **Rejet** systématique en contrôle qualité (selon norme ISO 5817)

4. Causes fréquentes:

- Température trop **basse** ou **insuffisante** pour assurer la fusion
- Vitesse de soudage **trop rapide**
- Mauvais **angle ou position** de la torche ou de l'électrode
- **Pollution de surface** (rouille, peinture, graisse...)
- **Mauvais écartement** ou mauvaise préparation du joint
- Utilisation de **courant trop faible**

5. Prévention :

- Ajuster correctement les **paramètres de soudage** (intensité, vitesse, tension)
- **Préparer soigneusement** les bords à souder
- Nettoyer les surfaces **avant soudage**
- Maintenir une **position correcte de la torche**

6. Méthodes de détection:

- **Contrôle par ultrasons (UT)** : très utilisé pour détecter les défauts de fusion
- **Radiographie industrielle (RT)**
- **Coupe macroscopique / essai destructif** (en laboratoire)
- Norme de référence : **ISO 6520-1** (classification des défauts)

VI.6. Défauts de pénétration :

1. Définition:

Un **défait de pénétration** (ou *manque de pénétration*) se produit lorsque le **métal d'apport** ne **traverse pas complètement la zone de jointure** des pièces à souder. Il s'agit donc d'un **manque de fusion à la racine** du joint, notamment dans les soudures bout à bout ou en angle.

Ce défaut compromet l'**intégrité structurelle** de l'assemblage, surtout lorsqu'il est soumis à des charges importantes.

2. Types de défauts de pénétration:

Type	Description
Pénétration insuffisante	Fusion partielle de la racine du joint
Absence totale de pénétration	Aucun métal fondu ne relie les deux bords du joint
Excès de pénétration	Trop de métal fondu traverse le joint (rare mais possible, peut aussi être un défaut)

Tableau IV.4 : Types de défauts de pénétration

3. Conséquences :

- **Faiblesse mécanique importante**
- **Fissuration** possible sous contrainte ou fatigue
- **Non-conformité** aux normes de soudage (ISO 5817, EN 1011)
- Défaut souvent **interne** et **invisible à l'œil nu**

4. Causes fréquentes :

- **Intensité de soudage trop faible**
- **Vitesse de soudage trop rapide**
- **Préparation du joint inadéquate** (mauvais chanfrein, écartement trop faible)
- **Électrode mal positionnée** ou torche mal inclinée
- **Mauvaise technique** du soudeur

5. Prévention :

- S'assurer d'un **bon réglage du courant de soudage**
- Adapter la **géométrie du joint** (chanfreins, ouverture de racine)
- Respecter les **normes de préparation des bords** (selon épaisseur)
- **Formation** adéquate des soudeurs
- Utilisation de **passes de pénétration** dans les soudures multi-passes

6. Méthodes de détection :

- **Ultrasons (UT)** : très utilisé pour les défauts internes
- **Radiographie (RT)** : permet de visualiser les discontinuités au cœur du joint
- **Examen macroscopique** après coupe (essai destructif)
- Norme ISO 6520-1 : Classification des imperfections

CONCLUSION

CONCLUSION

L'amélioration de la qualité des constructions soudées représente un enjeu majeur dans de nombreux secteurs industriels, notamment l'aéronautique, l'automobile, et le génie civil. À travers cette étude, nous avons mis en lumière l'importance d'une approche méthodique et rigoureuse dans l'optimisation des procédés de soudage, en intégrant des critères tels que le choix des matériaux, la maîtrise des paramètres opératoires et l'adoption de technologies avancées, comme le soudage sous atmosphère contrôlée.

Les résultats obtenus montrent que la qualité des soudures ne dépend pas uniquement du procédé utilisé, mais aussi d'une analyse approfondie des conditions de soudage et des propriétés des matériaux. La réduction des défauts, l'amélioration de la résistance mécanique et l'optimisation de la tenue à la fatigue sont autant de bénéfices qui peuvent être atteints grâce à une approche scientifique combinant expérimentation et modélisation.

Par ailleurs, les avancées technologiques et l'intégration de nouvelles méthodes de contrôle permettent aujourd'hui de garantir des assemblages plus fiables et durables. L'utilisation de techniques comme l'inspection par ultrasons, la tomographie industrielle ou l'analyse thermique contribue à la détection précoce des défauts et à l'amélioration continue des processus de fabrication.

Toutefois, certains défis demeurent, notamment la nécessité d'adapter les procédés de soudage à de nouveaux matériaux, comme les alliages à haute performance ou les composites. La recherche doit également se pencher sur l'impact environnemental des techniques de soudage et explorer des solutions plus durables, telles que la réduction des émissions de gaz et l'optimisation de la consommation énergétique.

Ainsi, l'amélioration de la qualité des constructions soudées repose sur une approche intégrée, combinant innovation technologique, maîtrise des procédés et amélioration continue des standards industriels. Cette étude apporte des éléments de réflexion et ouvre des perspectives pour de nouvelles recherches visant à renforcer encore davantage la fiabilité et la durabilité des soudures dans un contexte industriel toujours plus exigeant.

Bibliographie

1. <https://www.weldx.com/> Métaux d'Apport de Soudage & Produits de Soudure
2. [HARTEch.com/](https://www.hartech.com/) soudage MIG-MAG
3. <https://fr.airliquide.com/> les différents domaines d'applications de soudage MIG/MAG
4. <https://www.laser-rhone-alpes.com/soudure-laser/soudage-sous-atmosphere-controlee>
5. [Irepa Laser](#) Procédé du soudage des polymères
6. [Techniques de l'ingénieur – Calcul des cordons de soudure](#)
7. [Eurocode 3 – Calcul des structures en acier \(EN 1993\)](#)
8. [Techniques de l'Ingénieur – Défauts des soudures et leur prévention](#)
9. [Welding Handbook – American Welding Society \(AWS\)](#)
10. [INRS – Risques liés au soudage](#)
11. [Techniques de l'Ingénieur – Défauts des soudures](#)
12. [ISO 6520-1](#) : Classification des défauts
13. [ISO 5817](#) : Niveaux d'acceptation des défauts de soudure
14. [INRS – Risques et défauts du soudage](#)