

Sommaire

1.1	Introduction générale à la techno du soudage.....	4
1.2	Introduction aux procédé de soudage.....	4
	Liste des procédés de soudage.....	4
	Comparaison des différents procédés de soudage.....	4
1.3	Soudage au chalumeau et au procédés associés	5
	Principe Flamme oxyacétylénique :	5
	Domaine d'emploi.....	5
	Description du chalumeau et fonctionnement :	5
	Types de flamme :	6
	Gaz de soudage employés :	7
	Différents types de chalumeaux pour le soudage :	7
	Détermination de la puissance du chalumeau:.....	7
	Détendeur	7
	Mode opératoire :	7
	Préparation des bords :	7
	Comparaison des différents mélange de gaz :	7
	Hygiène et sécurité	8
1.4	Rappels d'électronique.....	8
1.5	L'arc.....	8
	la cathode : émission d'électrons, négative	9
	Le plasma d'arc	9
	L'anode.....	9
	Caractéristique de l'arc en statique tension /longueur d'arc	10
	Températures dans l'arc.....	10
	Les différents modes de transfert en soudage à l'arc	10
	Le soufflage magnétique et la striction.....	11
	Le pincement électromagnétique ou pinch effect	12
1.6	Sources de courant pour le soudage à l'arc.....	12
	La courbe caractéristique électrique statique des générateurs :CES.....	12
	Les générateurs.....	13
	échauffement des postes	13
1.7	Les gaz	14
1.8	Soudage TIG :141- GTAW	15
1.9	Soudage MIG/MAG et soudage avec fil fourré.....	21
	Désignation MIG /MAG.....	21
	Domaine d'emploi :	22
	Composition d'une installation de soudage :	22
	les différents régimes de transfert du métal :	22
	Les procédés dérivés.....	26
	En pratique.....	28
1.10	Les principales caractéristiques des fils fourrés 136 137	28
	Soudage à l'Arc sous protection de gaz actif avec fil - électrode fourré fusible.....	28
	Soudage à l'Arc sous protection de gaz inerte avec fil - électrode fourré fusible.....	29
	Soudage à l'Arc avec fil fourré sans gaz (Innershield)114.....	29
1.11	Soudage manuel avec électrodes enrobées :111	31
	Les différents types d'électrodes	32
	Rôle de l'enrobage :	32
	La désignation normalisé.....	34
	Particularité EE à la poudre de fer.....	34
	Avantage et inconvénients des électrodes basiques.....	34
	Avantages et inconvénient.....	34
	Paramètres du soudage SAEE	35
	Hygiène et sécurité	35
	Performances	35
	En pratique.....	35

1.12 Soudage sous flux en poudre N°121 122 125	35
Désignation normalisé	35
Le principe.....	35
Paramètres de soudage et influence	37
Amorçage de l'arc	37
Nature et utilisation du flux	37
Procédés dérivés	39
Hygiène et sécurité	39
Performances	39
1.13 Soudage par résistance N°21.22.23.24.25.....	39
Désignation normalisé	39
Le principe et résistance	40
Influence des résistances de contact et des résistances pures	40
Constitution d'un point de soudage	41
Mécanisme de constitution du point.....	41
Paramètres de soudage.....	43
Soudage par RESISTANCE PAR BOSSAGE	45
Mash Welding	47
Soudage en bout par ETINCELAGE.....	47
Soudage en bout par RESISTANCE PURE	48
1.14 Autres procédés de soudage.....	49
Le soudage Plasma	49
Le faisceau d'électron : n° 76	53
Le faisceau LASER : Procédé 751	57
1.15 Coupage et autres procédés de préparation des bords.....	61
Définition.....	61
Principe.....	61
Les différent type de coupage thermique :	61
Plasma :	61
Laser :	62
Oxycoupage.....	62
Arc air.....	62
Autre technique coupage non thermique	62
Avantage inconvénient	63
Les aciers au CrMn.....	63
Les aciers inox ferriques.....	63
Les aciers inox austénitiques	63
Conditions pour qu'un métal soit oxycoupable :	63
1.16 Revêtement par rechargement et par pulvérisation.....	63
Rechargement par projection à chaud.....	64
Rechargement par soudage	64
1.17 Brasage fort et brasage tendre.....	65
Définitions	65
Le mouillage.....	66
La diffusion	66
Capillarité	67
La tension de vapeur.....	67
Etats de surface.....	67
le flux.....	67
Synthèse : conditions pour brasier	68
1.18 ROBOTISATION.....	68
Définition.....	68
Principe.....	68
Installation.....	69
Le chariot motorisé.....	69
Les positionneurs.....	70
Le banc de soudage.....	70
La potence de soudage.....	70
Le robot de soudage.....	70
1.19 SOUDAGE PAR FRICTION	71
GENERALITE	71
Séquence de soudage	72

Matériel	72
Paramètres de soudage.....	72
Autres procédés de soudage	73
Contrôle des assemblages.....	73
1.20 SOUDAGE PAR ALUMINOTHERMIE	74
Désignation normalisée	74
Définition.....	74
Principe.....	74
Domaine d'emploi.....	74
Utilisation pour chauffage	75
Hygiène et sécurité	75
Raboutage de rail.....	75
1.21 SOUDAGE VERTICAL SOUS LAITIER	75
Désignation normalisée	76
Définition.....	76
Domaine d'emploi	76
Principes	76
Composition d'une installation.....	76
Paramètres opératoires.....	77
Procédés dérivés	77
1.22 SOUDAGE PAR DIFFUSION	77
GENERALITE	77
Désignation normalisée	77
Définition du procédé par diffusion.....	77
Installation pour soudage par diffusion	78
Opération de soudage	78
Paramètres du procédé.....	78
Mode opératoire.....	78
Micrographie de soudage par diffusion	78
Paramètres d'influence	78
Performances	78
1.23 SOUDAGE PAR ARC TOURNANT	79
GENERALITE	79
Mise en œuvre du procédé.....	79
Matériel (éléments constitutif d'une machine)	80
Paramètres de soudage.....	80
1.24 SOUDAGE PAR FRICTION MALAXER.....	81
GENERALITE	81
1.25 SOUDAGE PAR EXPLOSION.....	82
GENERALITE	82
1.26 Procédés d'assemblage des plastiques	84
Types de plastiques.....	84
Procédés de soudage.....	84
1.27 Défauts des soudures	85
Origine des défauts	85
Classement des défauts.....	85
Contrôle Visuel.....	87

1.1 Introduction générale à la techno du soudage

Soudage : opération consistant réunir deux pièces en assurant la continuité entre elles

Soudage autogène : c'est un soudage dont le métal d'apport est du même ordre de grandeur que le métal de base

Soudage par fusion : c'est du soudage par formation d'un joint par un bain fusion

Soudage par pression : soudage par force statique ou dynamique sans fusion

Brasage : soudage avec métal d'apport ayant une température de fusion inférieure au métal de base
brasage fort < 450°C < brasage tendre

Soudobrasage : idem brasage mais t° de fusion du métal de base proche de 450°

1.2 Introduction aux procédés de soudage

Liste des procédés de soudage

NUMÉRO	SIGLE	DÉSIGNATION FRANÇAISE	DÉSIGNATION ANGLAISE
111	ARC E.E. / SMAW / MMA	Soudage à l'arc avec électrodes enrobées	Shielding Metal Arc Welding or Metal
114	FIL FOURRE SANS GAZ /	Soudage à l'arc avec fil électrode fourré sans gaz	Flux Cored Arc Welding without gas
121	A.S.F. / SAW	Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre	Submerged Arc Welding
122	A.S.F. / SAW	Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre avec	Submerged Arc Welding
131	MIG / GMAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec fil	Metal Inert Gas or Gas Metal Arc Welding
135	MAG / GMAW	Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil	Metal Active Gas or Gas Metal Arc
136	FIL FOURRE AVEC GAZ /	Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil	Metal Active Gas or Flux Cored Arc
141	TIG / GTAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode	Gaz Tungsten Arc Welding
141 orbital	TIG ORBITAL / GTAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode	Gaz Tungsten Arc Welding
15	PLASMA / PAW	Soudage à l'arc électrique au plasma	Plasma Arc Welding
21	POINT / RSW	Soudage par résistance par point	Resistance Spot Welding
22	MOLETTE / RSEW	Soudage par résistance à la molette	Resistance Seam Welding
23	BOSSAGE /	Soudage par résistance par bossage	
24	ÉTINCELAGE / FW	Soudage en bout par étincelage	Flash Welding
311	OXYA / OAW	Soudage au chalumeau avec flamme oxyacétylénique	Oxy-Acetylen Welding
441	EXPLOSION / EXW	Soudage par explosion	Explosion Welding
45	DIFFUSION / DBW	Soudage par diffusion	Diffusion Bonding Welding
71	ALUMINOTHERMIE / TW	Soudage aluminothermique	Alumino-Thermic Welding
72	VERTICAL SOUS	Soudage vertical sous laitier	Electroslag Welding
73	VERTICAL SOUS GAZ /	Soudage vertical sous gaz de protection	Electrogas Welding
751	LASER / LBW	Soudage par faisceau laser	Laser Beam Welding
76	FAISCEAU ELECTRONS	Soudage par faisceau d'électrons	Electron Beam Welding
781	GOUJON / SW	Soudage à l'arc de goujons	Stud Arc Welding
NUMÉRO	SIGLE	DÉSIGNATION FRANÇAISE	DÉSIGNATION ANGLAISE

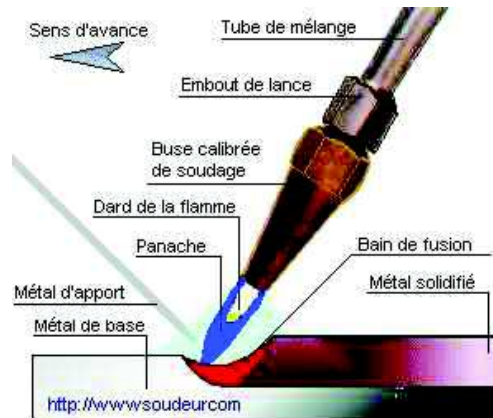
Comparaison des différents procédés de soudage

COMPARAISON DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE SOUDAGE				
Procédé de soudage codifié	Vitesse de soudage cm/min	Taux de dépôt de métal kg/h	Densité de courant A/mm ²	Pénétration du bain en mm
111	10 à 50	1 à 3	10 à 20	3 à 5 mm
114	25 à 60	5 à 12	100 à 300	3 à 5 mm
121	30 à 300	5 à 18	50 à 100	5 à 15 mm
131/135	25 à 100	3 à 9	100 à 200	3 à 4 mm
136	25 à 100	5 à 12	100 à 300	3 à 4 mm
141	5 à 50	moins de 1	5 à 50	2 à 4 mm

15	20 à 50	1	10 à 50	8 mm
311	5 à 10	moins de 1	/	2 à 4 mm
751	100 à 500	/	/	10 mm
76	100 à 1000	/	/	80 mm

1.3 Soudage au chalumeau et au procédés associés

Soudage à la flamme oxyacétylénique (**Procédé 311**)



Principe Flamme oxyacétylénique :

Source de chaleur : Fusion du métal de base et du métal d'apport à la flamme (3200°C).

Métal d'apport : Suivant métal de base

Gaz de combustion : Gaz combustible d'acétylène C_2H_2 avec un gaz comburant O_2 .

Acétylène provient de $CaC_2 + H_2O \rightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2$

Domaine d'emploi

Epaisseur ≤ 6 mm

Tuyauterie / plomberie / tôlerie

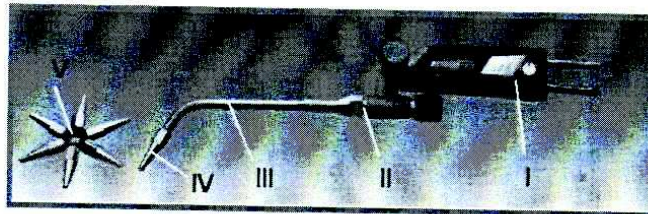
Réparation / soudage

Raboutage de tube de petits diamètres

Diversités de matériaux

Description du chalumeau et fonctionnement :

Le chalumeau est relié par deux boyaux d'amenée sur la bouteille de gaz acétylène et la bouteille d'oxygène par l'intermédiaire d'un manodétenteur avec un dispositif de sécurité.



- I Corps avec robinets de réglage et arrivées de gaz
- II Chambre de mélange des gaz
- III Lance
- IV Buse
- V étoile

1.3.1 Procédure d'allumage :

Régler les pressions préconisées par le constructeur.

Ouvrir très légèrement le robinet d'oxygène.
 Ouvrir largement le robinet d'acétylène.
 Allumer le mélange en sortie de buse avec un briquet ou un allume gaz.
 La flamme est carburante avec un excès important d'acétylène.
 Régler progressivement la flamme en agissant sur le robinet d'oxygène.
 baisser la pression d'acétylène si la flamme se décolle de la buse.

Pour éviter les flammèches noires à l'allumage, ouvrir d'abord légèrement l'oxygène, puis l'acétylène.
 Fermer les bouteilles de gaz (oxygène et acétylène) lors d'un arrêt prolongé du brasage ou du soudage
 Ne jamais laisser un chalumeau ouvert avec une flamme non allumée

Ne pas allumer un chalumeau avec le bout incandescent d'une cigarette
 Ne jamais accrocher un chalumeau allumé près ou sur les bouteilles de gaz
 Pour allumer un chalumeau, ouvrir l'oxygène puis l'acétylène
 Pour éteindre un chalumeau, fermer l'acétylène puis l'oxygène
 Ne jamais graisser les pièces en contact avec l'oxygène sous pression (inflammation spontanée ou coup de feu)
 Ne pas inhaler les fumées de soudage qui contiennent des oxydes de cadmium, bore, zinc, plomb, argent.

Types de flamme :

Type de flamme suivant rapport de consommation : $a = O_2 / (C_2H_2)$
 Si $a \rightarrow$ de 1 à 1,1 flamme réductrice (avide d'oxygène donc désoxydante)
 Si $a < 1$ flamme carburant.(excès d'acétylène donc ↗ du carbone)
 Si $a > 1,1$ flamme oxydante.

I → Dard	II → Dard	III → Zone réductrice	IV - Panache	
C_2H_2 et O_2	$C_2H_2 + O_2 = H_2 + 2CO + Q$	$2CO + H_2$	$2CO + O_2 = 2CO_2 + Q$ $H_2 + 1/2O_2 = H_2O + Q$	
	(3050°C)	(3100°C)	(2400°C)	
Echauffement des Gaz	Combustion+Réaction exothermique	Zone de soudage Zone réductrice	Oxydante car vapeur d'eau	
		$2CO + H_2 = 106.5$ Kcal	$2CO + O_2 = 136$ Kcal $H_2 + 1/2O_2 = 58$ Kcal	$\Rightarrow \cong 300$ Kcal
$C_2H_2 \rightarrow$ acétylène		$2CO \rightarrow$ gaz réducteur $H_2 \rightarrow$ gaz réducteur	$H_2O \rightarrow$ vapeur d'eau	

1.3.2 Flamme neutre ou normale (réductrice):

- Flamme normalement utilisée en soudage
- Dard de couleur blanche et brillant
- Soudage des aciers et cuivres

1.3.3 Flamme oxydante:

- Flamme avec excès d'oxygène
- La flamme émet un sifflement
- Utilisé en soudo - brasage ou soudage des laitons et bronze

1.3.4 Flamme carburante:

- Flamme avec excès d'acétylène
- Utilisé en soudage d'aluminium, plomb, zinc et fontes

Gaz de soudage employés :

- Oxygène : - Bouteille avec ogive de couleur blanche- Pression de service = 2 Bars.
- Acétylène : - Bouteille avec ogive de couleur marron- **Ne jamais Coucher la bouteille**
Peut être mise à 30° maxi

Différents types de chalumeaux pour le soudage :

Chalumeau haute pression : Utilisé avec ou sans aspiration quand

Pression C_2H_2 > Pression Mélange

Chalumeau basse pression : C_2H_2 avec pression de 0,01 bars à 0,1 bars / O_2 avec pression de 1 à 3 bars quand Pression C_2H_2 < Pression Mélange

Détermination de la puissance du chalumeau:

La puissance est déterminée par le débit de C_2H_2 , pour cela :
18 buses de 10 à 4000 l/h classée selon :

00 → 10 à 63 l/h

0 → 100 à 400 l/h

1 → 250 à 1000 l/h

2 → 1000 à 4000 l/h

Détendeur

Devra répondre aux conditions de service qu'on lui impose :

- Donner pression de détente régulière quelque soit pression de gaz à l'intérieur de la bouteille
- La pression reste la même quelque soit le débit
- La détente soit la plus régulière possible
- La manœuvre de la vis de détente donne une montée de pression progressive
- Permettre l'épuisement de la bouteille
- Que la surpression à la fermeture du robinet de départ soit aussi fiable que possible
- De résister au givrage
- Qu'il soit inflammable
- Qu'il soit simple et robuste
- Appareils délicats, doit être entretenu en bon état.

Les manomètres doivent être remplacés dès hors service. Pour détenteur O_2 , éviter toutes trace d'huile ou de graisse sur tous les organes. Toujours dévisser vis de détente lors du montage sur bouteille neuve et après utilisation.

Mode opératoire :

1.3.5 - Sens du déplacement du chalumeau en soudage :

1.3.5.1.1 - Soudage en avant (inclinaison de 50 à 70°)

- Bel aspect de cordon
- Pénétration améliorée
- Soudage des tôles jusqu'à 3 mm d'épaisseur

1.3.5.1.2 - Soudage en arrière (inclinaison de 45°)

- Vitesse plus importante
- Bonne maîtrise de la pénétration
- Aspect du cordon satisfaisant
- Soudage des tôles avec des épaisseurs supérieures à 3 mm

Préparation des bords :

- $e < 1$ mm : Bords relevés
- $2 < e < 4$: Bords droits
- $4 < e < 12$: Chanfrein en V
- $8 < e < 12$: Chanfrein en X

Comparaison des différents mélange de gaz :

Pas de flamme réductrice si pas acétylène

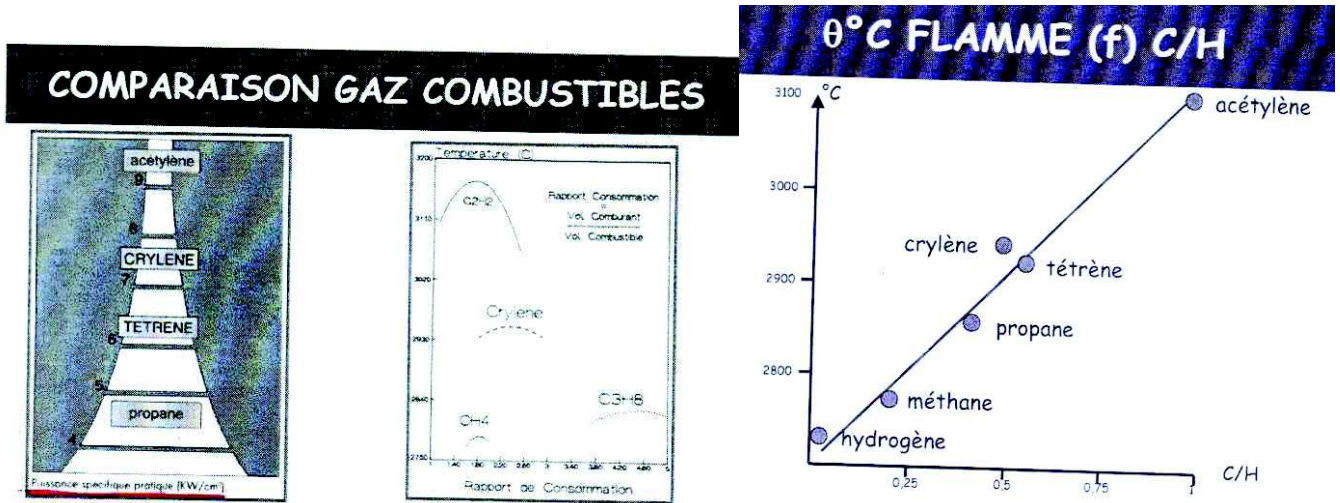
Type de gaz
 Crylene (C₂H₂-23% + ethylene
 72% + propylene 5%
 Propane C₃H₈
 Gaz Naturel CH₄
 Hydrogène

T° maxi
 2930

2820 °C (a = 3,8)
 2800°C pour a = 1,6
 2790°C pour a = 0,5

Utilisation
 Surtout oxycoupage

Gaz stable / oxycoupage
 Bon marché / oxycoupage
 Oxycoupage en eau profonde
 Flamme invisible → Dangereux



FLAMME	PUISSANCE SPECIFIQUE Kcal / cm ² / S	RAPPORT DE CONSOMMATION O ² / Gaz
OXYACETYLENIQUE	10	1,1
OXYHYDROGENE	3,5	0,5 (toujours une réaction oxydante)
OXYPROPANE	2,7	4 (toujours une réaction oxydante)
MELANGES DIVERS		3,5 (toujours une réaction oxydante)

Hygiène et sécurité

- Risques liés à l'acétylène (majorité des accidents de soudage en France).
- Manipulation des bouteilles.
 - o Ne jamais coucher une bouteille d'acétylène.
 - o Pression maxi acétylène 1,5 bar. Respect du débit maxi.
 - o Protection des bouteilles vis à vis des chocs et échauffement.
- Diaphragme d'éclatement extérieur sur réseau acétylène.
- Ne jamais graisser les pièces en contact avec O₂ sous pression (inflammation spontanée).
- Vérifier régulièrement l'état des tuyaux souples.
- Centrales de détente: respecter les consignes du producteur de gaz.
- Capacité détenteur > pression bouteille. Pb de givrage.
- Retour de flamme sur chalumeau.
- Protection individuelle: lunettes, chaussures, éviter tissus inflammables, casquette.
- Air s'enrichit en O₂ --> risque d'inflammation ou de combustion accélérée.

1.4 Rappels d'électronique

1.5 L'arc

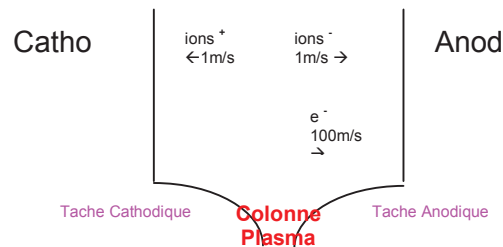
Principaux paramètres intervenant un arc en général

- la nature la forme et la dimension des électrodes

- La tension à vide joue beaucoup sur la maîtrise de l'amorçage de l'arc et sur la stabilité de l'arc
- Ecartement des électrodes **+écartement est grand +la tension d'amorçage est grande**
- Présence de gaz ionisant la tension d'amorçage varie suivant la nature et la pression des gaz en présence
- Cathode thermoïnique c'est l'électrode raccordée au moins du générateur

Dans l'arc il y a

- une tache brillante vers la cathode
- une tache de grand éclat vers l'anode dépendant du mélange gazeux
- une colonne de Plasma (gaz conducteur dont la résistance varie suivant la longueur)



la cathode : émission d'électrons, négative

C'est le siège de l'émission des électrons. Certains matériaux émettent facilement des électrons lorsqu'on les chauffe (par effet JOULE par exemple), c'est la thermoémissivité. On peut augmenter cette propriété en dopant la matière avec des oxydes par exemple. Le TUNGSTENE est un très bon thermoémissif surtout si l'on allie avec du THORIUM, CERUIM ou LANTHANE

Sous l'action de la chute de tension cathodique et du champ électrique créé entre l'électrode et la pièce, les électrons sont accélérés et se dirigent à grande vitesse vers l'anode.

La résistance apparente de l'arc est faible

Thermoémissivité : C'est l'aptitude de certains matériaux à émettre facilement des électrons

Le plasma d'arc

Sous l'action du champ électrique entre la cathode et l'anode, les électrons sont accélérés vers l'anode à plus de 100 m/s . Ils heurtent des atomes de gaz (Ar, He, N ...) et leur arrache des électrons qui vont se diriger aussi vers l'anode. En revanche ces ions positifs vont se diriger vers la cathode. A l'inverse d'autres atomes captent ces électrons (O_2) et se dirigent alors vers l'anode à 1 m/s . L'anode l'électrode positive

Les électrons vont de la cathode(-) vers l'anode (+)

L'anode

C'est le siège de la réintégration des électrons et des anions dans la matière au sein de la tache anodique

1.5.1 l'anode à la pièce (+) et + de pénétration

L'énergie cinétique des électrons fait s'échauffer la pièce et renforce la pénétration, ce phénomène est amplifié par l'affûtage des électrodes à 30° et les champs électriques qui guide et confine les particules vers le centre du bain

Cette polarité est utilisée

- TIG des métaux lourds
- Electrode rutilés
- Electrode basique en passe de pénétration ou soudage plafond

1.5.2 l'anode à l'électrode polarité inverse

Les électrons sont émis par la pièce vers l'électrode. Le bain est large et peu profond

Cette méthode est utilisée

- pour soudé des matériaux peu émissif avec une tension a vide très élevé (TIG et MIG)

- oxyder la surface du métal en MAG
- sous Flux à moins de 450 A
- meilleur taux de dépôt
- arrache les électrons a la pièce donc la désoxyde

1.5.3 le courant alternatif

A chaque demi-période la pièce et l'électrode est la cathode et l'anode, utilisé TIG alliage légers

Donc - La pénétration est entre la polarité inverse et directe

L'échauffement de l'électrode = idem et elle a tendance a se mettre en boule

Le décapage suffisant pour les alliages légers mais en TIG elle sera exclusivement en tungstène pur

Caractéristique de l'arc en statique tension /longueur d'arc

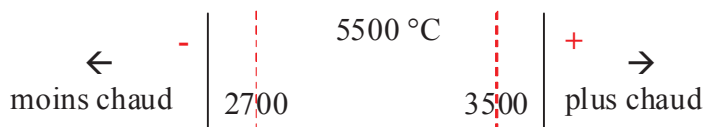
Lorsque l'arc électrique est établi, la tension à l'arc dépend de sa longueur. La partie centrale de l'arc se comporte comme une résistance pure. Plus l'arc est grand, plus la tension est élevée.

Si l'arc est long, il se défocalise et risque d'entraîner de l'air dans le bain de fusion et de perturber l'écoulement de métal (soufflures, projections, bain large, pénétration moindre)

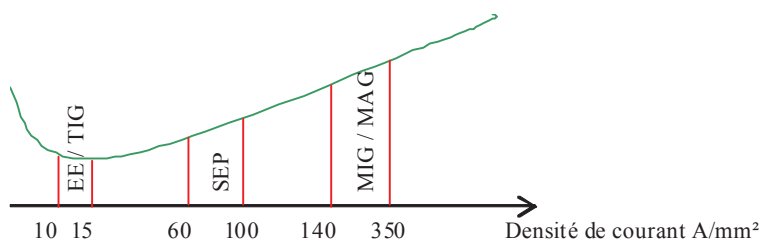
La longueur est inversement proportionnelle à la tension

- Transfert du métal dans l'arc
- le transfert par gravité
- gravité simple
- gravité avec force d'éjections
- gravité avec force de répulsion
- Il existe 3 modes de transfert secondaires : le court-circuit contrôlé, la veine liquide et le courant pulsé

Températures dans l'arc



Les différents modes de transfert en soudage à l'arc



1.5.4 Electrode :

Rutile : pulvérisation axiale

Basique : globulaire,

Le métal est propulsé par les gaz créés donc possibilité de souder au plafond

1.5.5 MIG :

Impossible de faire du court circuit. (utilisation du pulsé)

1.5.6 MAG :

Pas de pulvérisation avec CO₂ pur,

1.5.7 Transfert par court-circuit (short arc):

Le taux de fusion est faible (U et I faibles). Donc, l'arc est court. La goutte de métal en fusion entre en contact avec le bain de fusion. L'arc se désamorçe ce qui provoque une brusque montée de l'intensité jusqu'à I_{cc} . La densité de courant dans l'électrode ou le fil électrode augmente et permet le sectionnement électromagnétique de la goutte. L'arc se rétablit et on recommence le cycle.

Ce mode de transfert existe essentiellement en MAG 135 et 136.

1.5.8 Le transfert en vol libre par gravité

Le poids de la goutte de métal en fusion est supérieur aux forces de tension superficielles. Donc elle tombe dans le bain par gravité.

Ce mode de transfert existe sur l'électrode enrobée rutile ou basique 111, le MIG/MAG 131 135 136 et le TIG automatisé (141).

1.5.9 Le transfert par vol libre avec force d'attraction

L'intensité est plus élevée ce qui permet l'établissement de forces de Laplace suffisantes à l'existence de l'effet de pincement. La goutte va être sectionnée et projetée vers le bain de fusion par les forces de Laplace. On est en pulvérisation axiale.

Ce mode de transfert existe surtout pour le MAG 135 136.

1.5.10 Le transfert par vol libre avec force de répulsion

Dans ce cas, la tension superficielle de la goutte est bien supérieure aux forces de Laplace. Donc la goutte va grossir de façon importante et se détacher. Comme les forces de Laplace n'arrivent pas à contrecarrer les forces de tension superficielle, la goutte va se détacher et remonter éventuellement jusqu'au tube contact.

1.5.11 Transfert par pulvérisation axiale (spray arc):

La tension et l'intensité sont élevées, l'arc de soudage est plus stable. Le fil fond en fines gouttelettes projetées à grande vitesse dans le bain de fusion (bonne pénétration). À utiliser en général à partir de 5mm d'épaisseur, par contre qu'en passe de remplissage.

1.5.12 Transfert par grosses gouttes (globular) :

La tension et l'intensité ont un niveau intermédiaire entre les 2 régimes précédemment cités. Formation de grosses gouttes se détachant par gravité, mais leurs trajectoires aléatoires peuvent aboutir hors du chanfrein. CE régime est donc à éviter par contre il sera incontournable pour le procédé MIG à faible intensité car le régime court-circuit est impossible en atmosphère inerte

Le soufflage magnétique et la striction

Ces deux phénomènes sont dus aux forces périphériques appelées forces de LAPACE = I^2

1.5.13 La striction

Elle se décompose en deux forces l'une horizontale qui coupe le fil ramolli et l'autre verticale qui étire la goutte

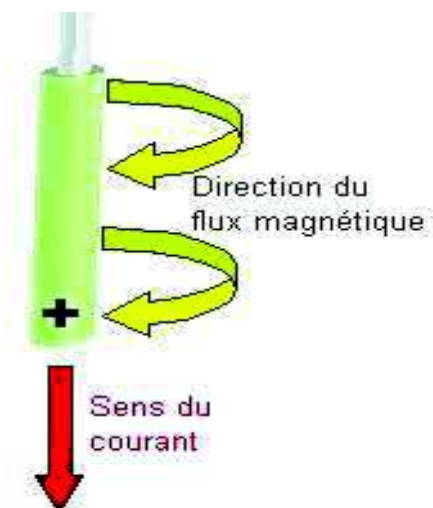
Plus l'intensité est élevée plus les gouttes seront petites

1.5.14 Le soufflage magnétique

Le soufflage magnétique de l'arc est un phénomène physique rencontré lors du soudage d'**aciers au carbone non allié** ou **faiblement allié**, d'**aciers ferritiques** et d'**aciers austéno-ferritiques** (duplex et super-duplex) avec un courant de soudage continu (CC ou DC).

Le phénomène se caractérise par une déviation incontrôlée de l'arc de soudage sur un bord du chanfrein ou de la tôle, à l'avant ou à l'arrière du sens d'avance. Le soufflage magnétique est générateur de défauts de soudage comme le manque de fusion, les inclusions de laitier, les soufflures, les projections. Chaque point d'agrafage chaque discontinuité est source de perturbation ou changement de direction du champ magnétique provoquant un soufflage de l'arc.

Le soufflage magnétique est engendré par les lignes de flux magnétique créées par le passage de courant à travers l'âme de l'électrode ou du fil.



Ces lignes de flux magnétique sont de formes circulaires et sont perpendiculaires à l'axe du passage de courant. Le phénomène de soufflage magnétique est difficilement prévisible. Le soufflage magnétique est principalement rencontré lors du soudage en **courant continu** de pièces assemblées en angle et lors de l'assemblage par soudage de pièces avec des chanfreins profonds et des bords serrés. Le soufflage magnétique est accentué par l'effet d'arête des extrémités de tôles. L'apparition d'un soufflage magnétique est très importante lorsque l'intensité de soudage est supérieure à 250 ampères.

Les solutions proposées ci-dessous ne sont pas des remèdes miracles. Toutefois, elles permettent de limiter ou de contrôler la déviation de l'arc électrique lors du soudage.

Utiliser un courant alternatif en remplacement du courant continu (principalement pour le procédé ARC E.E. / 111 / SMAW).

- Réduire l'intensité de soudage dans la mesure du possible.
- Maintenir un arc de soudage très court.
- Placer des appendices de bonnes dimensions aux extrémités des pièces à souder.
- Pointer correctement la pièce à souder pour fermer le champ magnétique et limiter la dispersion des lignes de force
- Adapter la position et l'inclinaison de l'électrode enrobée ou de la torche pour contrecarrer la déviation de l'arc.
- Opter pour un soudage à pas de pèlerin (soudage fractionné) qui limite le soufflage magnétique.
- Enrouler le câble de masse autour de la pièce à souder (création d'une self) et placer le connecteur de masse le plus près possible de la pince de soudage.
- Changer le sens de soudage lorsque vous atteignez les extrémités de tôles pour limiter l'effet d'arête des bords.
- Doubler les prises des connecteurs de masse et positionner chaque prise à chaque extrémité de la pièce à souder.
- Démagnétiser vos pièces avant soudage.
- Interdire l'utilisation de dispositif d'aimantation pour la manutention ou le contrôle magnétoscopique avant soudage

Le pincement électromagnétique ou pinch effect

Lorsque le conducteur est parcouru par un courant, les forces de Laplace s'appliquent le long du conducteur. Ces forces sont proportionnelles à I^2 . Elles sont inefficaces quand le fil est solide mais elles entrent en jeu lorsque celui-ci se ramollit par effet joule.

Elles ont 2 composantes : une verticale qui étire la goutte et une horizontale qui pince et détache la goutte. Si $I \nearrow$, la striction \nearrow , la taille des gouttes \searrow .

C'est ce phénomène qui est à l'origine de la veine liquide lors du mode de transfert par pulvérisation axiale en MAG lorsque la densité de courant atteint 250 A/mm^2 .

1.6 Sources de courant pour le soudage à l'arc

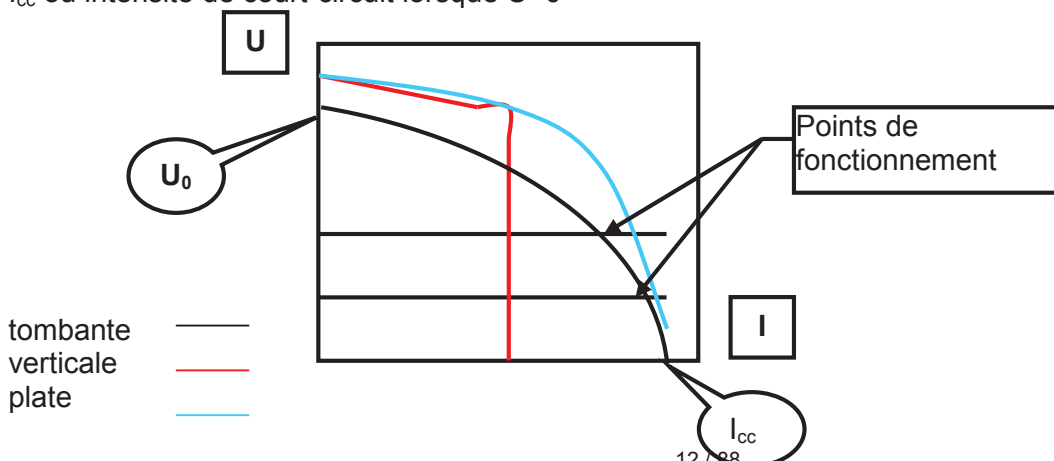
La courbe caractéristique électrique statique des générateurs :CES

chaque générateur va débiter une certaine intensité « I » sous une certaine tension « U » .

La fonction $U = f(I)$ C'est l'étude de la fonction $U=f(I)$. Deux points sont particulièrement intéressants :

U_0 ou tension à vide lorsque $I=0$

I_{cc} ou intensité de court-circuit lorsque $U=0$



1.6.1 Plongeante ou tombante

- Utilisation dans le cas où l'on veut garder l'intensité constante quelle que soit la hauteur d'arc
- Utilisation en 111 et 141
- Hauteur d'arc ↑ la tension ↑ l'intensité ↓

1.6.2 verticale

c'est des transformateur redresseur classique ou des onduleurs contrôlés

le contrôle de la commande mesure et corrige l'intensité par rapport à la tension suivant une consigne en permanence

utilisation surtout pour le soudage plasma

Hauteur d'arc ↑↓ la tension ↑↓ l'intensité =

1.6.3 plate

utilisation => recherche d'une tension constante ex 135 136 procédé fil-électrode sauf le soudage sous flux parce que l'intensité est trop grande 500 A

Hauteur d'arc = la tension = l'intensité ↓↑

Cette CES permet de réguler la fusion du fil électrode. En effet, si le fil fond trop vite, la longueur d'arc ↗. Donc l'intensité ↘↘↘ et le fil refroidit et retrouve sa longueur initiale. Si le fil fond trop lentement, la longueur d'arc ↘. Donc l'intensité ↗↗↗ et le fil chauffe plus, fond plus vite et retrouve sa longueur initiale

Les générateurs

1.6.4 les tournants

généralement des génératrices à courant continu entraîné par un moteur très robuste mais plus fabriqué depuis 1980 environ

1.6.5 les transformateurs monophasés

Ils sont utilisés pour le soudage en courant alternatif pour les postes à électrode enrobée et TIG. Leur CES plongeante est obtenue par saturation du circuit magnétique ou par fuite magnétique. La tension à vide U_0 de ces générateurs joue un rôle important dans l'amorçage et la stabilité de l'arc. Actuellement ils sont remplacés par des générateurs à courant alternatif utilisant la technologie des hacheurs onduleurs attention il déséquilibre les réseaux de distribution

1.6.6 les transformateurs redresseurs triphasés

À partir du triphasé du réseau le redresseur transforme en courant continu

Réglage par choix multiple (liens procédé /courbe caractéristique)

Par synergie cad mesure et régulation « I » suivant « U »

1.6.7 les sources a onduleurs

plus petit pour une même puissance que ces derniers grâce à une fréquence de courant plus élevée suivant leurs commandes ils sont soit à tension constante ou à intensité constante

échauffement des postes

Comme tout transformateur il y a des pertes cuivre (loi de joules $P_c = a \cdot I^2$) et des pertes fer (magnétiques) Le facteur de marche (X) est le rapport sur l'intervalle de temps donné, de la durée de la charge à la durée totale. En soudage il existe le conventionnel et opérationnel

1.6.8 Le facteur de marche conventionnel

Par période de 10min le générateur débite dans une résistance fixe pendant une durée de 3.5 min (X=35%), 6 min (X=60%) et 10 min (X=100%). On regarde ce que le générateur est capable de délivrer sans arriver à un échauffement destructeur

1.6.9 Le facteur de marche opérationnel

C'est le rapport du temps de soudage effectif sur le temps total (pointage et nettoyage d'une soudure => coût d'une soudure

1.7 Les gaz

Elle sert à protéger le bain de fusion et le transfert du métal des composés de l'air ambiant suivants : N₂, O₂, H₂. Elle permet aussi de stabiliser l'arc électrique

1.7.1 Argon :

- Gaz neutre. Environ 0.1% dans l'air le moins rare. Obtenu par distillation. Densité 1.37
- Facilement ionisable (potentiel d'ionisation bas)
- Conducteur de la chaleur médiocre
- Forme de la racine en doigt de gant (difficultés de laisser remonter les gaz donc risque de soufflure → **Pénétration et mouillage faibles à l'état pur**)
- Amorçage et stabilité de l'arc facilité

1.7.2 Hélium :

- gaz inerte plus léger que l'air (d=0.14)
- Difficilement ionisable (potentiel d'ionisation élevé)
- Arc instable
- bon conducteur de la chaleur
- augmente l'énergie de soudage
- modifie la forme du cordon (racine massive, excellente compacité, bon mouillage) → **Pénétration, mouillage, vitesse de soudage ↗**

1.7.3 Azote :

- Il n'est pas réactif en dessous de 650°C car la formation de nitrures au -delà. Gaz plasmagène au contact de l'électrode avec formation de nitrures.
- Utilisé en gaz plasmagène pour certains aciers duplex ou en coupage
- Utilisé comme protection envers uniquement avec les aciers austénitiques
- Utilisé pour inerte les capacités
- Peu onéreux

1.7.4 Gaz actif

Ils sont de deux catégories : les réducteurs (hydrogène) et les oxydants (oxygène, et dioxyde de carbone). Les gaz oxydants favorisent la mouillabilité, et forment des oxydes qui sont plus thermo-émissif que le métal sain, donc l'arc chauffe plus que sans gaz oxydant. Il est impossible d'avoir un arc stable avec de l'argon pur sur l'acier

1.7.5 Gaz oxydant

1.7.6 Oxygène

On l'utilise pour souder plus vite car il fluidifie le bain de fusion (↗ largeur) et toujours avec un gaz neutre Argon ou Argon / Hélium, on dit qu'il est 4 fois plus oxydant que le CO₂

- toujours en mélange
- oxydant
- cristallisation à grain fin
- améliore :
 - **la stabilité de l'arc**
 - **la mouillabilité**
 - **fluidité du bain**
 - **la température du bain**
- diminue les projections

1.7.7 le CO₂

- gaz réducteur, mais carburant

- mouillabilité moyenne, racine massive, bonne compacité → P, largeur, viscosité ↗
- pur => pas de pulvérisation axiale
- utilisé pour les aciers non et faiblement alliés
- arc peu stable et projections

1.7.8 Gaz réducteur

1.7.9 Hydrogène :

Il n'est plus utilisé seul, le soudage oxhydrique a de très rare application.

- composition mélange neutre ou neutre /oxydant pour les aciers inoxydables
- pouvoir réducteur
- potentiel ionisation très élevé
- bonne conductibilité thermique donc forte pénétration ou vitesse de soudage élevée

1.8 Soudage TIG :141- GTAW

1924 premier TIG USA et 1948 en France

1.8.1 Le principe

Un arc électrique est obtenu entre une électrode réfractaire thermo-émissif (tungstène +oxyde) et la pièce. Le bain est protégé par un gaz toujours inerte (Hélium, Argon ou argon hélium) à l'endroit et à l'envers (argon ou azote) .il s'utilise avec ou sans métal d'apport , en baguette ou en fil (\varnothing 0.6 à1 mm) en automatique

Le soudage TIG s'utilise sur les métaux et alliage soudable même(le titane, le zirconium ou le molybdène) avec une grande qualité

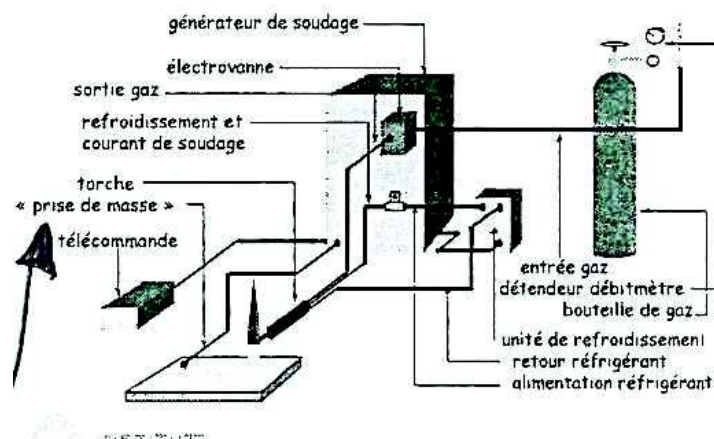
Vitesse de soudage et taux de dépôts très faible couramment utilise pour les ep 0.5 à 08 mm, il peut être utilisé pour les pénétration s

Pas de gaz Actif car cela pollue l'électrode W puis le bain de fusion

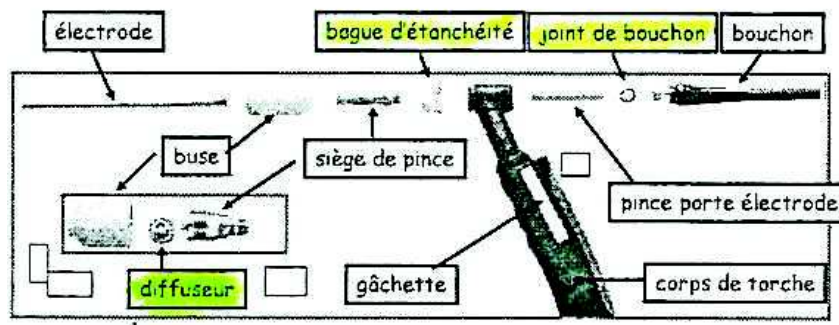
1.8.2 Domaine d'utilisation

- Utilisé sur tous les métaux et alliages soudables (y compris les + difficiles comme le titane, zirconium, molybdène ou béryllium...)
- Procédé de soudage lent, volume de métal déposé peu important
- Couramment employé pour souder les épaisseurs de 0.5 à 8 mm. Utilisé sur épaisseur supérieure seulement pour assurer les passes de pénétration
- Domaine d'emploi : construction de matériels pour les industries chimiques et alimentaires, chaudronnerie d'acier inoxydable, industries nucléaire, aéronautique et spatiale et toutes les industries mettant en œuvre les aciers inoxydables et alliages légers.
- Employé principalement en soudage manuel mais peut-être automatisé.
- La limite d'utilisation est atteinte lorsque la T°C de volatilisation du matériau est supérieure à 3000°C (Le bain a une T°C de $\theta_f + 1000^\circ\text{C}$)

1.8.3 Installations de soudage



1.8.4 La torche de soudage



1.8.5 Générateur de courant (CES plongeante ou verticale)

Intensité allant de 10 à 400A, avec tension à vide $U_0 = 60$ à $90V$.
 Caractéristique statique plongeante ou verticale comme le SAE (sont + ou – compatible)
 Tension conventionnelle à l'arc : $U_2 = 10 + 0,04 I_2$ (à $100A U_2 = 14V$)

Sans dispositifs intermédiaires, en continu ou alternatif, l'arc ne peut être obtenu que par court-circuit entre l'électrode et la pièce. Ce contact entre l'électrode et la pièce occasionne dans bien des cas la pollution du métal et de l'électrode. Ces dispositifs de courant à haute tension (6000 à 15000 V) et à haute fréquence sont introduits dans le circuit de soudage après accomplissement du cycle pré-gaz. Ces tensions HF sont coupées dès amorçage de l'arc.

Dans certain cas, pour remédier aux problèmes de HF (tension élevée et perturbation radioélectrique), il est possible d'utiliser, en courant continu, un arc de faible puissance (arc pilote) établi entre l'électrode et une électrode auxiliaire intégré à la buse. L'ionisation de gaz permet un amorçage spontané de l'arc principal par simple rapprochement avec la pièce.

En soudage en courant alternatif, en principe, la tension s'annule cent fois par seconde. L'arc s'éteint et se rétablit à ce rythme. Pour favoriser la stabilité de l'arc, on utilise 3 principes :

- Maintient de l'onde HF en permanence \Rightarrow HT \Rightarrow des perturbations radioélectriques.
- Utilisation d'un dispositif stabilisateur de tension
- Substitution d'un courant sinusoïdal par un courant carré.

1.8.6 Les machines

- le générateur de courant
- tension à vide de 60 à 90 v
- intensité possible 10 à 400 A
- caractéristique statique plongeantes ou verticale
- alternatif ou continu
- pour obtenir un démarrage sans pollution on utilise les HF 6000v à 15000v ou bien par un arc de faible intensité en courant continu pour ionisé le gaz
- en courant alternatif on utilise HF en permanence avec un stabilisateur d'arc +courant sinusoïdal carré (hacheur onduleur)

1.8.7 les électrodes

L'électrode doit pouvoir résister à la chaleur produite par l'arc (le tungstène fond à $3410^{\circ}C$ +il émet beaucoup d'électrons) on le dope avec des oxyde Thorium de zirconium de lanthane ou de cérium (0.15 à 4.20 %)

codification	Nature de l'oxyde	%	couleur
WP			vert
WT4	Thorium	0.35 à 0.55	Bleu
WT10		0.8 à 1.20	Jaune
WT20		1.7 à 2.20	Rouge
WT30		2.80 à 3.20	Violet
WT 40		3.80 à 4.20	Orange
WZ3	Zirconium	0.15 à 0.5	Brun
WZ8		0.70 à 0.9	Blanc

WL10	Lanthane	0.9 à 1.20	Noir
WC20	Cérium	1.80 à 2.20	gris

Pour chaque électrode il est conseillé d'utiliser 60 à 85 % de l'intensité maximal conseillé pour favoriser la thermoémissivité

Le reste en continu WT 20 (rouge) WC 20 (gris)	Alu et alliages (alternatif) WP pur (vert) → Alu WZ 8 (blanc)
--	---

1.8.7.1.1 domaine d'utilisation

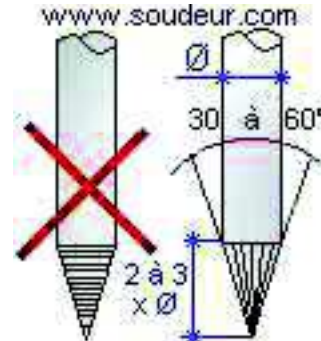
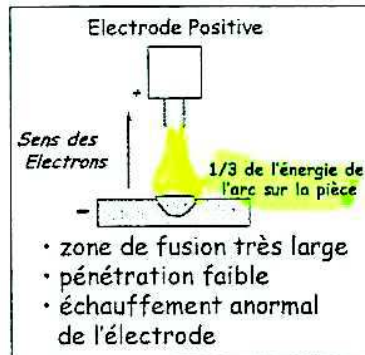
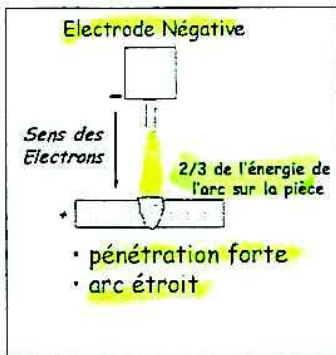
Plage d'utilisation en intensité pour les diamètres courants d'électrode

Electrode Ø en mm	Acier inoxydable - continu tungstène thorié 2% (WT20)	Alliages légers - alternatif tungstène pur (WP)
1	10 - 80 A	10 - 50 A
1,6	50 - 120 A	40 - 80 A
2	90 - 190 A	60 - 110 A
2,4	100 - 230 A	70 - 120 A
3,2	170 - 300 A	90 - 180 A
4	260 - 450 A	160 - 240 A
4,8	400 - 650 A	200 - 300 A

≈ 80A.mm Ø ≈ 60A.mm Ø

Handwritten notes:
 $\approx 40A \cdot mm^2 = 30A \cdot mm^2$
 valeur donnée pour Arc
 si gaz + chaud, le Ø
 $\frac{I}{\pi r^2}$

1.8.8 Le courant continu

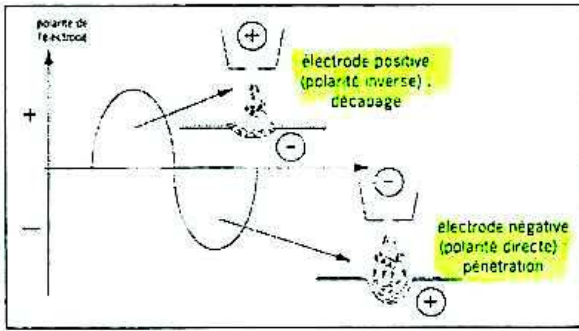


- En polarité directe (-) à électrode arc stable bain étroit et profond avec une électrode affûté
- En polarité inverse le (+) à l'électrode échauffement important de l'électrode donc elle se met en boule permet de crever les oxyde de la pièce (Décapage). Bain large et peu profond . utilisation de hélium améliore la pénétration (cas de l'aluminium)

Inconvénient

- beaucoup inclusion de tungstène dans la pièces

1.8.9 Le courant alternatif



Utilisé pour alu et ses alliages (sans décapage des pièces le soudage est impossible : alumine fond à 2000°C et alu vers 660°C). Pour ne pas utiliser la polarité inverse avec ses inconvénients, on utilise le courant alternatif 50Hz : alternance positive favorise le décapage et alternance négative favorise la pénétration avec de électrode WP ou WZ (point de fusion 4000° C. certains générateur permettent de dé symétriser les 2 alternance permettant ainsi de plus pénétrer que décaper

1.8.10 Les gaz

Composition chimique	Acier au carbone	Acier inox austénitique	Alu cuivre titane	remarques
Ar	x	x	x	Ionisation facile / tous métaux
He			x	Ionisation difficile
Ar 80% He 20%	x	x	x	
Ar 30% He 70%	x	x	x	
Ar 97.5% H ₂ 2.5%	x	x		
Ar 95% H ₂ 5%	x	x		
Ar 90% H₂ 10%		x		
Ar 75% He 20% H ₂ 5%		x		

Plus l'intensité est grande plus le diamètre augmente avec un débit de 1l/mm de diamètre

En envers pour éviter le rochage c'est une oxydation du bain à l'envers il faut inerte l'envers avec de l'azote ou de l'argon avec un débit 1 à 3 l/min pour les inox (1/2 fois le débit de l'endroit)

Coefficient de correction si utilisation d'un débitmètre différent que le gaz utilisé

$$Q = Q_1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_1}}$$

Q₁ = débit mesuré avec gaz de masse volumique ρ₁

Q = débit recherché avec gaz de masse volumique ρ

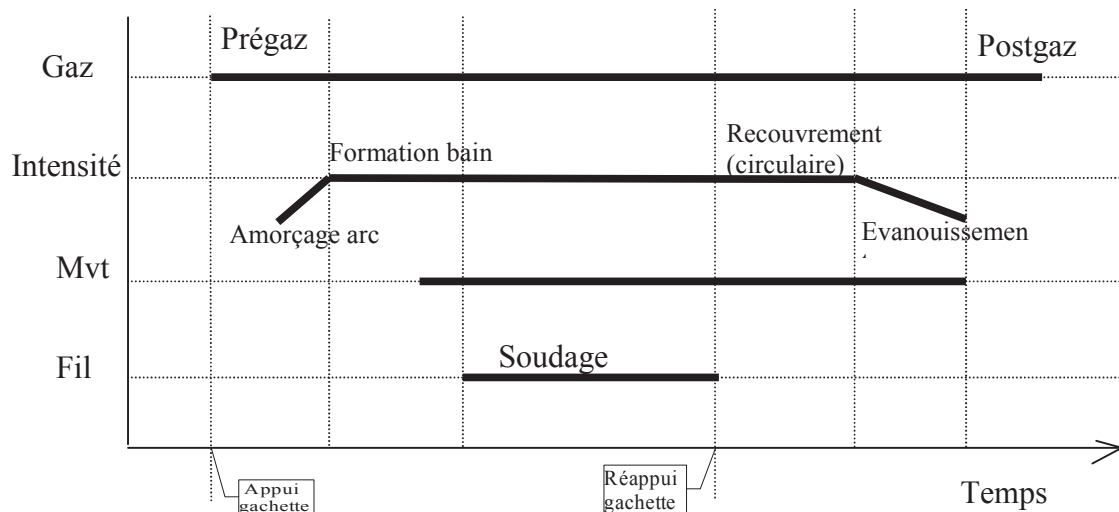
$$\text{Ar} = 1,65 \text{ g/l} \quad \text{He} = 0,17 \text{ g/l} \quad \text{N} = 1,16 \text{ g/l} \quad \text{H}_2 = 0,083 \text{ g/l}$$

Pour les aciers non alliés il n'est nécessaire mais améliore le profil et l'état de surface

Pour le Titane Tantale zirconium ... sensible à l'oxydation à chaud on ajoute un traînard ou on soude dans une boîte à gants

Les pièces doivent être propre (pas corrosion et de graisse) soit nettoyage mécanique soit pas nettoyage chimique

1.8.11 Le cycle de soudage



1.8.12 En pratique

1.8.12.1.1 Préparation des bords

- Cas des aciers :

Type de soudage	Ep < 0,5 mm	0,5 < ep ≤ 3 mm	Ep > 4 mm
Bout à bout	Bords relevés h 3 à 4ep	Jeu 0 si ép < 4mm ; 1 si < 6 mm ; 1,5 mm si ép < 10 mm	V 70° + jeu 9 mm X 70° + jeu 9 mm
Angle intérieur	Pas de préparation spéciale		
A recouvrement	Pas de préparation spéciale		

- Cas des alliages légers :

Type de soudage	Ep < 1,5 mm	1 < ep ≤ 3 mm	Ep = 4 et 5 mm	Ep ≥ 6 mm
Bout à bout	Bords relevés h 3 à 4 ép	Carres légèrement abattues en envers	Carres fortement abattues en envers (2 côtés pour 5 mm)	V 60° + carres abattues envers
Angle intérieur	Pas de préparation spéciale			
A recouvrement	Pas de préparation spéciale			

1.8.12.1.2 Positions de soudage

Type de soudage	Angle torche	Inclinaison / joint	Angle / joint
A plat			
Bout à bout	70 à 80°	10 à 20°	90°
Joint angle extérieur	70 à 80°	10 à 20°	90°
Joint angle intérieur	80°	10 à 30°	45°
Joint à recouvrement	80°	10 à 30°	50 à 70°
En montant			
Bout à bout	70 à 80°	10 à 20°	90°
Angle extérieur	60 à 70°	10 à 20°	90°
Angle intérieur	80°	10 à 20°	45°
Joint de recouvrement	70 à 80°	10 à 20°	50 à 70°
En corniche			
Bout à bout	70 à 80°	30 à 40°	90°
Joint de recouvrement	70 à 80°	20 à 30°	50 à 70°
Au plafond			
Bout à bout	70°	30 à 45°	90°
Angle extérieur	60°	30 à 45°	90°
Angle intérieur	60°	45°	55°
Joint de recouvrement	70°	30 à 45°	55°

1.8.13 Les procédés dérivés

1.8.13.1.1 Le tig pulsé

- Utilise dans le cas où l'écoulement e chaleur est difficile
- Recherche de la maîtrise de l'énergie du bain de fusion de la pénétration
- Pour les métaux lourds en courant continu
- Pour alliages légers en courant alternatif

On utilise également les caractéristiques du courant pulsé sur le procédé TIG et MAG à faible énergie afin de mieux maîtriser l'énergie de soudage, la pénétration et le volume du bain de fusion. Cela permet de souder :

- Souder des tubes en position
- Souder des faibles épaisseurs
- Souder des métaux et alliages difficiles
- On peut souder avec du courant continu (-métaux lourds) ou alternatif.(alliages légers).

Plus grande maîtrise de l'énergie de soudage, du volume du bain de fusion et de la pénétration. Ce procédé sert surtout dans le soudage des alliages légers (Cu, Al ...). Ce mode peut être utilisé en continu ou en alternatif. Pendant le temps chaud où l'intensité est forte, le bain de fusion se forme. Tandis que pendant le temps froid, la chaleur ne s'évacue pas car l'énergie qui vient d'être apportée est faible. Donc cela permet de former le bain de fusion sans avoir à augmenter la vitesse d'avance au cours du soudage. En effet, avec les matériaux ayant une forte conductivité thermique, il faut apporter beaucoup d'énergie pour former le bain de fusion et contrecarrer la dissipation thermique, donc on a une forte intensité. Cependant après avoir soudé quelques centimètres, la pièce est chaude et n'évacue plus autant de chaleur, donc l'énergie de soudage que l'on apporte est plus importante qu'au départ et on est obligé d'augmenter la vitesse de soudage pour éviter l'effondrement du bain. Donc le mode pulsé permet d'avoir l'intensité nécessaire à la formation du bain tout en ayant une intensité moyenne plus faible, donc une énergie de soudage moyenne plus faible. Ce mode permet aussi d'améliorer les conditions opératoires du soudage en position

1.8.13.1.2 TIG orbital entièrement automatique

TIG double flux ou TIG rigidifié

accroît les performance par en constrictant l'arc par un deuxième flux gazeux et pouvoir soudé => 5mm sur inox en 1 passe sans préparation

1.8.13.1.3 TIG fil chaud en automatique

1.8.13.1.4 TIG multi-cathode plusieurs électrodes

1.8.13.1.5 A-TIG

utilisation d'un flux en automatique pour augmenter la puissance de l'arc

1.8.14 Hygiène et Sécurité

Electrique :

- Utilisation de conducteurs isolés
- Mise à la terre des appareils
- Dispositif coupure auto du courant
- Port de gants isolant en soudage

Rayonnements :

- Rayonnement important 4 fois plus d'UV et 1,5 fois plus IR que EE
- Casque plutôt que masque → liberté de mouvement / 2 mais libres

Respiratoires :

- Surface bien nettoyée évite fumées des graisses, sinon pas de fumées
- Gaz Argon plus lourd que l'air et risque d'asphyxie

1.8.15 Avantages et Inconvénients

Avantages	Inconvénient
Arc très doux	Taux de dépôts faibles 300 g /h
Fusion et apport du métal séparé	Faibles épaisseurs
Possibles sur tous les métaux	Engendre des déformations
Toutes positions	HF perturbe les robots radioélectrique
Faciles a piloter avec des énergies faibles	Vitesse de soudage 15 à 30 cm /min
Dépôts de très grande qualité	
Vitesse de refroidissement faible	

1.9 Soudage MIG/MAG et soudage avec fil fourré

Désignation MIG /MAG

Désignation française : **MAG** (Soudage à l'Arc sous protection de gaz actif avec fil - électrode fusible)

Désignation américaine : GMAW (Gaz Metal Arc Welding)

Désignation numérique : **135**

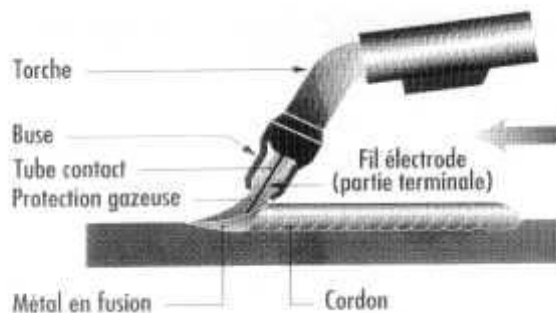
MIG pour soudage des alliages légers, des bases Nickel et des bases cuivres

Soudage électrique à l'arc en atmosphère gazeuse neutre avec électrode fusible. Utilisé pour alliage léger des bases Nickel et des bases cuivres.

Désignation française : **MIG** (Soudage à l'Arc sous protection de gaz inerte avec fil - électrode fusible)

Désignation américaine : GMAW (Gaz Métal Arc Welding)

Désignation numérique : **131**



Source de chaleur : Arc électrique entre le fil et la pièce à souder assurant la fusion du métal d'apport et de la pièce.

Métal d'apport : le métal d'apport est soit un fil plein ou un fil fourré. Certains fils fourrés produisent un laitier, d'autres non.

Protection gazeuse : le gaz provient de la buse,

- il est soit actif (CO₂)
- soit activé (mélanges Ar + CO₂, Ar + O₂, Ar + CO₂ + O₂).

Facteur de marche : supérieur à celui de l'électrode enrobée.

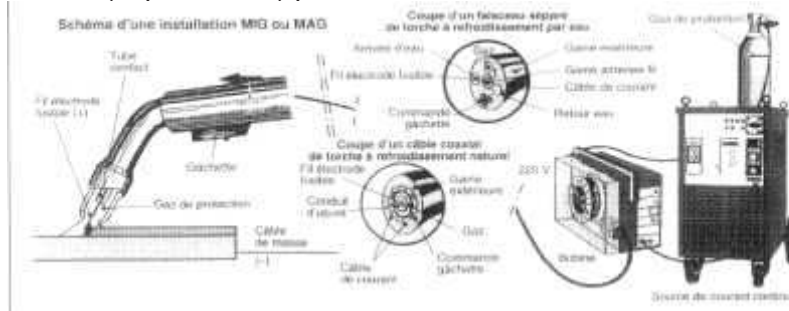
Courbe caractéristique (**CES**) plate - $U_2 = 14 + 0,05 I_2$ ($I_2 \leq 600$ A) et $U_2 = 44V$ si $I_2 > 600A$

Domaine d'emploi :

- Il couvre le vaste domaine de l'électrode enrobée.
- Procédé automatisable et robotisable (vitesse de soudage supérieure à 1m/min).
- MAG pour charpente métallique, agricole (limité en chantier à cause de sa protection gazeuse).
- Il représente aujourd'hui 50% environ du poids de métal déposé

Composition d'une installation de soudage :

- **Une source de courant** : Générateur de courant continu ($30A < I < 450A$) , il délivre une tension constante quelque soit l'intensité. L'intensité de court-circuit élevée permet un amorçage instantané de l'arc. Générateur de courant . Sa CES est plate ou horizontale.
- **Une tension à vide** varie entre 10 à 60 volts.
- **Polarité** : Toujours inverse (le plus au fil). polarité directe inutilisable



- **Un coffret de commande** : le plus souvent intégré au générateur.
- **Un dévidoir** : Ce dévidoir entraîne le fil à l'aide de galets à vitesse régulière (Vitesse \uparrow = intensité \uparrow). Il a également le rôle de faire contact entre le fil et la ligne de soudage.

Dévidage poussé : le fil est poussé dans la gaine (longueur maxi = 4m).

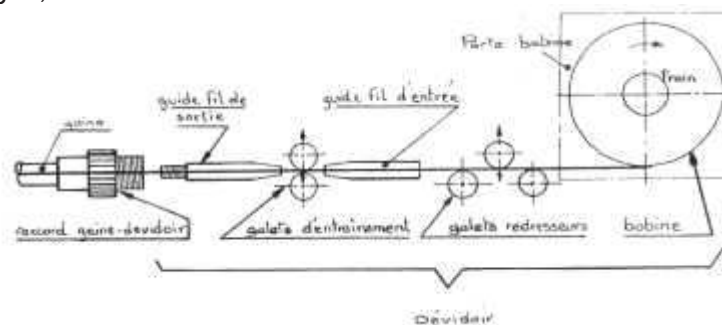
Dévidage tiré : le fil est tiré depuis le pistolet, pour fil mou ou de petit diamètre, allongement du faisceau possible.

Dévidage poussé – tiré : Combinaison des deux systèmes.

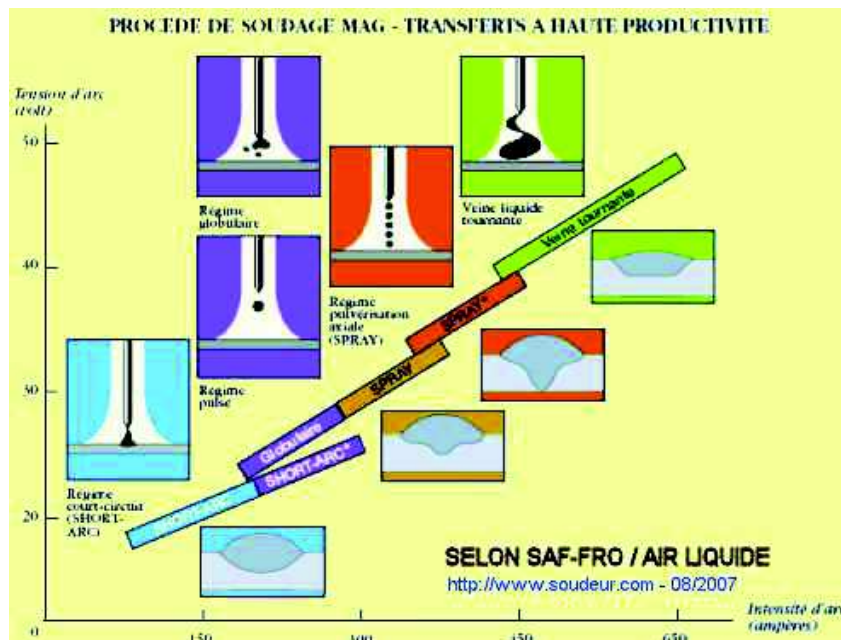
Dévidage séparé : le dévidoir est indépendant du poste, à utiliser quand le poste ne pas être mis à proximité du chantier.

- Une alimentation en gaz : Gaz de protection
- **Refroidissement** : circuit d'eau de refroidissement pour les intensité supérieures à 300A.
- Une torche ou un pistolet

Un faisceau : Composé d'une gaine, le câble d'amenée de courant, les câbles reliés au boîtier de commande, le tuyau de gaz, les canalisations d'eau si torche refroidie..



les différents régimes de transfert du métal :

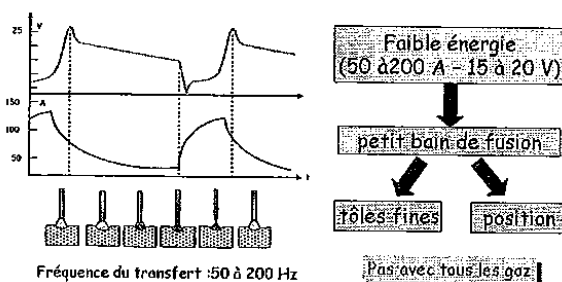


1.9.1 Transfert par court-circuit (short arc): Uniquement en MAG

La tension et l'intensité (vitesse de fil) sont faibles → 50 à 200 A ; 15 à 20 V

- la goutte de métal fondu vient en contact du bain de fusion donc court-circuit ce qui conduit à une remontée de l'intensité et détachement de la goutte (projection importante)
- en général utilisé pour les passes de pénétration et en position.
- Sensible au collage et aux projections

LE COURT CIRCUIT

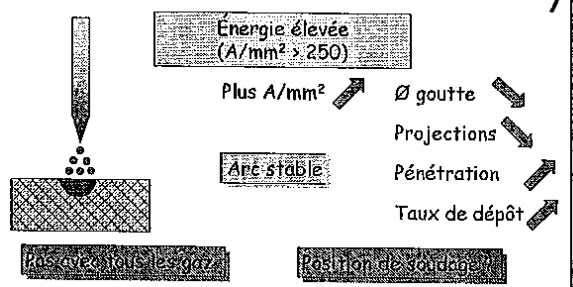


1.9.2 Transfert par pulvérisation axiale (spray arc): Impossible en CO₂ pur

La tension et l'intensité sont élevées → >250 A/mm²

- l'arc de soudage est plus stable.
- Le fil fond en fines gouttelettes projetées à grande vitesse dans le bain de fusion (bonne pénétration).
- A utiliser en général à partir de 5mm d'épaisseur, par contre qu'en passe de remplissage. Utilisable qu'en courant lisse

LA PULVERISATION AXIALE (spray)

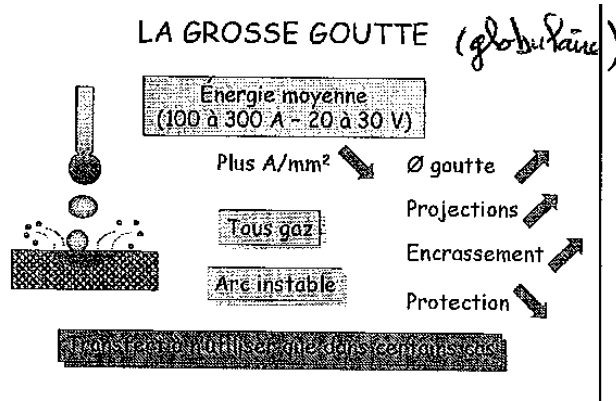


1.9.3 Transfert par grosses gouttes (globular) :

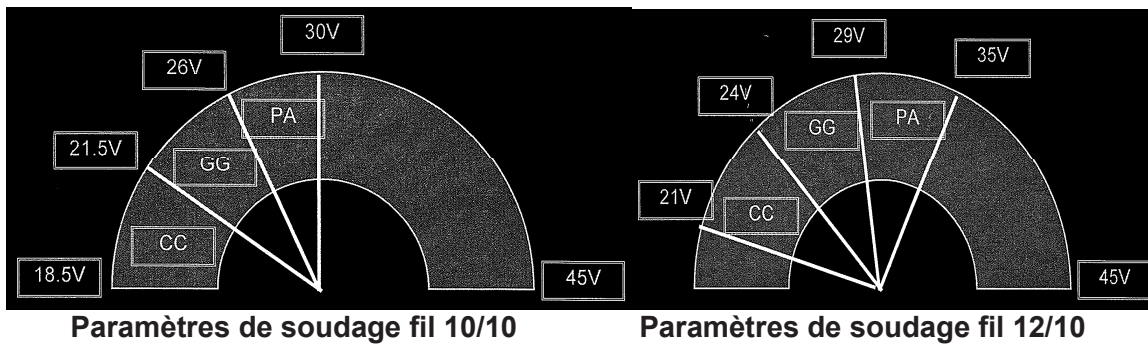
La tension et l'intensité ont un niveau intermédiaire entre les 2 régimes précédemment cités.

- Formation de grosses gouttes se détachant par gravité, mais leurs trajectoires aléatoires peuvent aboutir hors du chanfrein.

- Ce régime est donc à éviter.



Le réglage et les modes de transfert dépendent du diamètre de fil utilisé, 1 fil de plus grand diamètre verra les plages de tension augmenter pour les différents modes de transfert.



1.9.4 La veine liquide rotative) :

Intensité élevée : 500 – 750 A
 Vitesse fil élevée : 30 à 50 m/min
 Rotation 800 à 1000 tr/min

Cordon large et peu de pénétration → remplissage

1.9.5 L'influence des gaz utilisés

Utilisation		groupe	nom	Utilisation
MIG	Gaz inertes et purs	I	Ar, He, Ar +He	Alu, cuivre, nickel
	Gaz réducteurs	R	Ar, H ₂	
MAG	Gaz mélanges	M	<i>Ar + CO₂, Ar+ O₂, Ar + CO₂ + O₂</i>	<i>Acier au carbone et inox austénitique</i>
	Gaz actifs	C	CO ₂ , CO ₂ + O ₂	

Régime / Gaz	Argon pur	Argon + CO2	CO2
		Inertes pure	Mélange
Court-circuit	NON	OUI	OUI
Grosses goutte	OUI	OUI	OUI
Pulvérisation axiale	OUI	OUI	NON



- **Le débit** : Le débit des gaz préconisé est de 1 l/min/mm de diamètre de buse (de 12 à 20 L/min).

1.9.6 Les fils pleins :

- **Diamètre** : 0,6 / 0,8 / 1 / 1,2 / 1,6 / 2 / 2,4 / 3,2

- Le régime court-circuit ne sera pas possible avec des fils supérieurs à 1,2mm.

1.9.7 Paramètres opératoires :

1.9.7.1.1 Tension d'arc :

Intervient sur les modes de transfert pour un diamètre de fil donné et pour une longueur d'arc.

+ ϕ fil \nearrow , + les fourchettes de réglages \nearrow

+ U \nearrow , + P \searrow + L (et I) \nearrow : si U augmente pénétration diminue et largeur augmente avec risque de caniveau

1.9.7.1.2 Intensité du courant de soudage :

L'intensité de soudage est déterminée par la vitesse d'avance du fil

+ ϕ fil \nearrow , + Es doit \nearrow

+ ϕ fil \searrow , + Vfil \nearrow

Quand I \nearrow , P \nearrow et taux de dépôt \nearrow

+ ϕ fil \searrow , + P \nearrow

1.9.7.1.3 La self :

Rôle : s'opposer aux variations d'intensité \rightarrow amortisseur

Utilisée en court-circuit pour limiter les projections.

- Trop forte tendance au collage

- Trop faible tendance plus de projections

1.9.7.1.4 Longueur de fil sortie (stick out) :

L'augmentation de cette longueur entraîne une vitesse de fusion plus rapide du fil, ce qui entraînera une variation de pénétration. Cette longueur devra être contrôlée par le soudeur (environ 15 mm pour les fil standard).

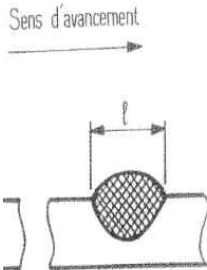
Si Pt (partie terminal) \nearrow alors taux de dépôt \nearrow et P \searrow

1.9.7.1.5 Vitesse d'avance :

Si Vs \nearrow P \searrow

Une augmentation de la vitesse d'avance réduit le chauffage de la pièce, et à l'inverse une réduction de la vitesse d'avance chauffe plus la pièce ; hors une vitesse trop lente va creuser la pièce par l'arc créant une grosse goutte qui empêchera le métal de chauffer.

1.9.8 Sens de soudage :

<p>Soudage en tirant (à droite)</p> <p>Sens d'avancement</p> 	<p>Ce sens donnera une pénétration et une surépaisseur plus importantes, par contre la vitesse de soudage sera réduite à cause du manque de visibilité du joint.</p>
<p>Soudage en poussant (à gauche)</p>	<p>Ce sens donnera une pénétration et une surépaisseur moins importantes, la vitesse de soudage sera plus grande car la visibilité du cordon et totale.</p>



1.9.8.1.1 Pour résumer :

Si paramètres ↗	Largeur L	Pénétration P	Surépaisseur
Intensité de soudage	↗	↗	↗
Vit. Dévidage fil	↗	↗	↗
Tension soudage	↗	↗	↗
Stick Out	↗	↘	↘
Vitesse soudage	↘	↘	↘
En tirant	↘	↗	↗
En poussant	↗	↘	↘

1.9.9 Préparation des pièces à souder :

Sur les aciers (non alliés ou inoxydable) :

- $e \leq 1,5$ mm : Bords droits sans écartement
- $1,5 < e < 4$ mm : Bords droits avec écartement
- $4 < e < 12$ mm : chanfrein en V
- $e \geq 12$ mm : chanfrein en X, si l'accès envers est possible
- $e \geq 12$ mm : chanfrein en V ou en tulipe, si l'accès envers n'est pas possible

Les procédés dérivés

1.9.10 MIG/MAG Pulsé :

Le but est d'alterner le régime court-circuit avec la pulvérisation axiale tout en conservant une **intensité moyenne relativement faible**.

Intérêt :

- Permet le soudage des alliages légers et des aciers inoxydables en faible épaisseur
- - Permet le soudage en position par la maniabilité du bain de fusion
- - Permet d'obtenir de beaux aspects de cordons, sans projections.
- -.Mais la mise au point des paramètres est délicate (Mode synergique préférable
- travail en position,
- Limitation du risquer de collage / régime en court circuit.

Inconvénient

- Paramètres difficiles à régler si l'on sort des pré réglages réalisés par le fabricant (appareils synergiques).
- Prix des installations élevé.

Pour ce faire, on utilise une source de courant pulsé permettant, pendant les périodes de forte intensité de former et détacher une goutte de métal de l'extrémité du fil et pendant les périodes de faible intensité de conserver un arc électrique (contrairement au régime de court circuit). On déclenche à intervalles réguliers et réglables aussi bien en intensité qu'en durée, des impulsions de courant qui provoquent un transfert par pulvérisation axiale.

La pulsation du courant permet de conserver un régime du type pulvérisation axiale dans la gamme des basses intensités conduisant normalement au régime de courts-circuits.