

Formation IWT

1	Procédés et matériels de soudage.....	9
1.1	INTRODUCTION GENERALE A LA TECHNO DU SOUDAGE	9
1.2	INTRODUCTION AUX PROCEDE DE SOUDAGE.....	9
1.2.1	LISTE DES PROCEDES DE SOUDAGE.....	9
1.2.2	COMPARAISON DES DIFFERENTS PROCEDES DE SOUDAGE.....	10
1.3	SOUDAGE AU CHALUMEAU ET AU PROCEDES ASSOCIES	11
1.3.1	PRINCIPE FLAMME OXYACETHYLENIQUE :	11
1.3.2	DESCRIPTION DU CHALUMEAU ET FONCTIONNEMENT :	11
1.3.3	TYPES DE FLAMME :	12
1.3.4	GAZ DE SOUDAGE EMPLOYES :	13
1.3.5	DIFFERENTS TYPES DE CHALUMEAUX POUR LE SOUDAGE :	13
1.3.6	DETENDEUR.....	13
1.3.7	MODE OPERATOIRE :	14
1.3.8	PREPARATION DES BORDS :	14
1.3.9	COMPARAISON DES DIFFERENTS MELANGE DE GAZ :	14
1.3.10	HYGIENE ET SECURITE	15
1.4	RAPPELS D'ELECTRONIQUE.....	15
1.5	L'ARC.....	15
1.5.1	LA CATHODE : EMISION D'ELECTRONS, NEGATIVE	16
1.5.2	LE PLASMA D'ARC	16
1.5.3	L'ANODE	16
1.5.4	CARACTERISTIQUE DE L'ARC EN STATIQUE TENSION /LONGUEUR D'ARC.....	17
1.5.5	LES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT EN SOUDAGE A L'ARC.....	18
1.5.6	LE SOUFFLAGE MAGNETIQUE ET LA STRICTION.....	19
1.5.7	LE PINCEMENT ELECTROMAGNETIQUE OU PINCH EFFECT	21
1.6	SOURCES DE COURANT POUR LE SOUDAGE A L'ARC.....	21
1.6.1	LA COURBE CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE STATIQUE DES GENERATEURS :CES21	21
1.6.2	LES GENERATEURS	22
1.6.3	ECHAUFFEMENT DES POSTES.....	23
1.7	LES GAZ	23
1.8	INTRODUCTION AU SOUDAGE A L'ARC SOUS PROTECTION GAZEUSE	25
1.9	SOUDAGE TIG :141	25
1.9.1	LE PRINCIPE	25
1.9.2	DOMAINE D'UTILISATION	26
1.9.3	GENERATEUR DE COURANT : (CES PLONGEANTE OU VERTICALE)	26
1.9.4	LES MACHINES.....	27
1.9.5	LES GAZ.....	28
1.9.6	PROCEDES DERIVES	29
1.9.7	HYGIENE ET SECURITE	30
1.9.8	AVANTAGES ET INCONVENIENT.....	31
1.10	SOUDAGE MIG/MAG ET SOUDAGE AVEC FIL FOURRE	31

1.10.1	DESIGNATION MIG /MAG	31
1.10.2	DOMAINE D'EMPLOI :	32
1.10.3	COMPOSITION D'UNE INSTALLATION DE SOUDAGE :	32
1.10.4	LES DIFFERENTS REGIMES DE TRANSFERT DU METAL :	33
1.10.5	LES PROCEDES DERIVES	35
1.11	LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES FILS FOURRES 136 137.....	37
1.11.1	SOUDAGE A L'ARC SOUS PROTECTION DE GAZ ACTIF AVEC FIL - ELECTRODE FOURRE FUSIBLE	37
1.11.2	SOUDAGE A L'ARC SOUS PROTECTION DE GAZ INERTE AVEC FIL - ELECTRODE FOURRE FUSIBLE	37
1.11.3	SOUDAGE A L'ARC AVEC FIL FOURRE SANS GAZ (INNERSHIELD)114	38
1.12	SOUDAGE MANUEL AVEC ELECTRODES ENROBEES :111.....	41
1.12.1	LES DIFFERENTS TYPES D'ELECTRODES	42
1.12.2	ROLE DE L'ENROBAGE :	42
1.12.3	LA DESIGNATION NORMALISE	46
1.12.4	PARTICULARITE EE A LA POUDRE DE FER.....	46
1.12.5	AVANTAGE ET INCONVENIENTS DES ELECTRODES BASIQUES.....	46
1.12.6	AVANTAGES ET INCONVENIENT.....	46
1.12.7	PARAMETRES DU SOUDAGE SAAE	47
1.12.8	HYGIENE ET SECURITE	47
1.12.9	PERFORMANCES.....	47
1.13	SOUDAGE SOUS FLUX EN POUDRE N°121 122 125	48
1.13.1	DESIGNATION NORMALISE	48
1.13.2	LE PRINCIPE	48
1.13.3	PARAMETRES DE SOUDAGE ET INFLUENCE	50
1.13.4	AMORÇAGE DE L'ARC	51
1.13.5	NATURE ET UTILISATION DU FLUX	51
1.13.6	PROCEDES DERIVES	53
1.13.7	HYGIENE ET SECURITE	53
1.13.8	PERFORMANCES.....	53
1.14	SOUDAGE PAR RESISTANCE N°21.22.23.24.25.....	54
1.14.1	DESIGNATION NORMALISE	54
1.14.2	LE PRINCIPE ET RESISTANCE.....	54
1.14.3	INFLUENCE DES RESISTANCES DE CONTACT ET DES RESISTANCES PURES	55
1.14.4	CONSTITUTION D'UN POINT DE SOUDAGE	56
1.14.5	MECANISME DE CONSTITUTION DU POINT	57
1.14.6	LES MACHINES	58
1.14.7	PARAMETRES DE SOUDAGE.....	59
1.14.8	SOUDAGE PAR RESISTANCE PAR BOSSAGE	61
1.14.9	SOUDAGE EN BOUT PAR ETINCELAGE	64
1.14.10	SOUDAGE EN BOUT PAR RESISTANCE PURE	67
1.14.11	SOUDAGE PAR DECHARGES DE CONDENSATEUR	68
1.14.12	SOUDAGE EN TRIPHASE REDRESSE.....	68
1.15	AUTRE PROCEDES DE SOUDAGE	68
1.15.1	LE SOUDAGE PLASMA : 15	69

1.15.2	FAISCEAU D'ELECTRON : N°76.....	73
1.15.3	LE FAISCEAU LASER PROCEDE 751	77
1.16	COUPAGE ET AUTRES PROCEDES DE PREPARATION DES BORDS	83
1.16.1	DEFINITION	83
1.16.2	PRINCIPE	84
1.16.3	LES DIFFERENT TYPE DE COUPAGE THERMIQUE :	84
1.16.4	PLASMA :	85
1.16.5	LASER :	85
1.16.6	OXYCOUPAGE	85
1.16.7	ARC AIR	87
1.16.8	AUTRE TECHNIQUE COUPAGE NON THERMIQUE.....	87
1.16.9	AVANTAGE INCONVENIENT	87
1.16.10	LES ACIERS AU CRMN.....	88
1.16.11	LES ACIERS INOX FERRIQUES.....	88
1.16.12	LES ACIERS INOX AUSTENITIQUES.....	88
1.16.13	CONDITIONS POUR QU'UN METAL SOIT OXYCOUPABLE :	88
1.17	REVETEMENT PAR RECHARGEMENT ET PAR PULVERISATION	89
1.17.1	RECHARGEMENT PAR PROJECTION A CHAUD	90
1.17.2	RECHARGEMENT PAR SOUDAGE	90
1.18	BRASAGE FORT ET BRASAGE TENDRE	92
1.18.1	DEFINITIONS	92
1.18.2	PHENOMENES INTERVENANTS LE MOUILLAGE.....	93
1.18.3	LA DIFFUSION	94
1.18.4	CAPILLARITE	95
1.18.5	LA TENSION DE VAPEUR.....	95
1.18.6	ETATS DE SURFACE.....	95
1.18.7	LE FLUX	96
1.18.8	SYNTHESE : CONDITIONS POUR BRASER.....	96
1.19	ROBOTISATION	97
1.19.1	DEFINITION	97
1.19.2	PRINCIPE	97
1.19.3	INSTALLATION.....	98
1.19.4	LE CHARIOT MOTORISE.....	98
1.19.5	LES POSITIONNEURS	99
1.19.6	LE BANC DE SOUDAGE.....	100
1.19.7	LA POTENCE DE SOUDAGE	100
1.19.8	LE ROBOT DE SOUDAGE.....	101
1.20	SOUDAGE PAR FRICTION	102
1.20.1	GENERALITE	102
1.20.2	SEQUENCE DE SOUDAGE	103
1.20.3	MATERIEL	104
1.20.4	PARAMETRES DE SOUDAGE	104
1.20.5	AUTRES PROCEDES DE SOUDAGE.....	105
1.20.6	CONTROLE DES ASSEMBLAGES	106
1.21	SOUDAGE PAR ALUMINOTHERMIE.....	106

1.21.1	DESIGNATION NORMALISEE.....	107
1.21.2	DEFINITION	107
1.21.3	PRINCIPE	107
1.21.4	DOMAINE D'EMPLOI	107
1.21.5	UTILISATION POUR CHAUFFAGE	108
1.21.6	HYGIENE ET SECURITE	108
1.21.7	RABOUTAGE DE RAIL	108
1.22	SOUDAGE VERTICAL SOUS LAITIER.....	109
1.22.1	DESIGNATION NORMALISEE.....	109
1.22.2	DEFINITION	109
1.22.3	DOMAINE D'EMPLOI.....	110
1.22.4	PRINCIPES	110
1.22.5	COMPOSITION D'UN INSTALLATION.....	111
1.22.6	PARAMETRES OPERATOIRES.....	111
1.22.7	PROCEDES DERIVES	111
1.23	SOUDAGE PAR DIFFUSION	112
1.23.1	GENERALITE	112
1.23.2	DESIGNATION NORMALISEE.....	112
1.23.3	DEFINITION DU PROCEDE PAR DIFFUSION	112
1.23.4	INSTALLATION POUR SOUDAGE PAR DIFFUSION	113
1.23.5	OPERATION DE SOUDAGE	113
1.23.6	PARAMETRES DU PROCEDE	113
1.23.7	MODE OPERATOIRE	114
1.23.8	MICROGRAPHIE DE SOUDAGE PAR DIFFUSION	114
1.23.9	PARAMETRES D'INFLUENCE	114
1.23.10	PERFORMANCES.....	114
1.24	SOUDAGE PAR ARC TOURNANT	114
1.24.1	GENERALITE	115
1.24.2	MISE EN ŒUVRE DU PROCEDE.....	116
1.24.3	MATERIEL (ELEMENTS CONSTITUTIF D'UNE MACHINE).....	116
1.24.4	PARAMETRES DE SOUDAGE	117
1.25	SOUDAGE PAR FRICTION MALAXER	118
1.25.1	GENERALITE	118
1.26	SOUDAGE PAR EXPLOSION	120
1.26.1	GENERALITE	120
1.27	PROCEDES D'ASSEMBLAGE DES PLASTIQUES PROCEDES D'ASSEMBLAGES DES MATERIAUX AVANCES	122
2	Les matériaux et leur comportement lors du soudage	123
2.1	PHENOMENES DE FISSURATION DES ACIERS.....	123
2.1.1	LA FISSURATION A FROID	123
2.1.2	FISSURATION AU RECHAUFFAGE.....	126
2.1.3	VIEILLISSEMENT :	126

2.2	INTRODUCTION A LA CORROSION	127
2.2.1	NOTIONS FONDAMENTALES	127
2.2.2	INFLUENCE DU SOUDAGE SUR LA CORROSION	128
2.2.3	LES REMEDES EN SOUDAGE	129
2.3	INTRODUCTION A LA SOUDABILITE ET A LA METALLURGIE	129
2.3.1	CRITERES DE SOUDABILITE	129
2.3.2	FACTEURS INFLUENTS SUR LES CRITERES DE SOUDABILITE.....	129
2.4	RAPPELS ELEMENTAIRES DE METALLURGIE DU FER.....	131
2.4.1	TRANSFORMATIONS DU FER.....	131
2.4.2	DIAGRAMME FER-CARBONE	131
2.4.3	TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS	132
2.4.4	LES TRAITEMENTS THERMOMECHANIQUES	134
2.4.5	LES ELEMENTS D'ADDITION	134
2.4.6	L'EFFERVESCENCE	135
2.4.7	LES SEGREGATION.....	136
2.5	ASPECT THERMIQUE DU SOUDAGE	136
2.5.1	PRINCIPE	136
2.5.2	LES FACTEURS ESSENTIELS DU CYCLE THERMIQUE	137
2.5.3	DIAGRAMME TRC ET TRCS	138
2.6	LES DIFFERENTES ZONES D'UNE SOUDURE	139
2.6.1	LA ZF	139
2.6.2	LA ZAT.....	140
2.6.3	LA DILUTION	141
2.7	ACIER NON ET FAIBLEMENT ALLIES	143
2.7.1	DEFINITION	144
2.7.2	FISSURATION A FROID	145
2.7.3	MECANISME DE LA FISSURATION A FROID	147
2.7.4	VIEILLISSEMENT	150
2.7.5	ARRACHEMENT LAMELLAIRE	151
2.7.6	FISSURATION AU RECHAUFFAGE.....	152
2.7.7	FISSURATION A CHAUD	153
2.7.8	GROSSISSEMENT DU GRAIN ET SURCHAUFFE DES ACIERS :.....	154
2.8	LES ACIERS INOXYDABLES	157
2.8.1	INTRODUCTION :	157
2.8.2	LES INOX MARTENSITIQUES ET FERRITIQUES	157
2.8.3	INOX AUSTENITIQUE	161
2.8.4	INOX AUSTENO-FERRITIQUE OU DUPLEX.....	164
2.8.5	DIAGRAMME DE SCHAEFFLER.....	165
2.8.6	TRAITEMENTS THERMIQUES APRES SOUDAGE SUR LES INOX	168
2.9	LES ALUMINIUM.....	168
2.9.1	ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	168
2.9.2	SOUDABILITE OPERATOIRE	168
2.9.3	SOUDABILITE METALLURGIQUE.....	169
2.10	LES ALLIAGES DE NICKEL.....	172
2.10.1	PROPRIETES	172

2.10.2	LES ALLIAGES.....	172
2.10.3	CONSIGNE DE SOUDAGE.....	172
2.11	LE TITANE ET SES ALLIAGES.....	173
2.11.1	PROPRIETES.....	173
2.11.2	SOUDABILITE.....	174
2.11.3	PREPARATION.....	174
2.11.4	PROCEDES.....	175
2.12	LES ALLIAGES DE CUIVRE.....	175
2.12.1	PROPRIETES.....	175
2.12.2	SOUDABILITE.....	176
2.13	LES ESSAIS MECANIQUES.....	177
2.13.1	ESSAI DE TRACTION.....	178
2.13.2	ESSAI DE FLEXION PAR CHOC.....	180
2.13.3	ESSAI DE DURETE.....	182
2.13.4	ESSAI DE PLIAGE.....	184
3	Conception et calcul.....	184
3.1	NOTIONS FONDAMENTALES DE RESISTANCE DES MATERIAUX.....	184
3.1.1	RELATION ENTRE EFFORT ET CONTRAINTE, THEORIE DE L'ELASTICITE.....	184
3.1.2	DEFORMATION ELASTIQUE ET PLASTIQUE.....	185
3.1.3	FACTEUR DE CONCENTRATION DES CONTRAINTES.....	185
3.1.4	COMPORTEMENT DES MATERIAUX DANS LES DIFFERENTES CONDITIONS DE CHARGES (TENSION, COMPRESSION CISAILEMENT ...).....	185
3.1.5	CALCUL DE CONTRAINTES.....	186
3.1.6	TYPES DE FRACTURES EN FONCTION DES CONTRAINTES.....	189
3.1.7	UTILISATIONS DES NORMES ET SPECIFICATION.....	189
3.2	LES BASES DE LA CONCEPTION DES SOUDURES.....	189
3.3	PRINCIPES DE CONCEPTION DES STRUCTURES SOUDEES.....	190
3.4	CONCEPTIONS DES JOINTS.....	190
3.5	FATIGUE.....	190
3.5.1	DEFORMATION EXCESSIVE :.....	190
3.5.2	INSTABILITE PLASTIQUE :.....	190
3.5.3	INSTABILITE ELASTIQUE :.....	190
3.5.4	DEFORMATION PROGRESSIVE :.....	190
3.5.5	DEFINITION DE LA FATIGUE :.....	191
3.5.6	ESSAIS ET CALCULS EN FATIGUE.....	191
3.6	LA MECANIQUE DE LA RUPTURE.....	196
3.7	CALCUL D'UNE POUTRE.....	198
3.7.1	MODE DE RUINES.....	199
3.7.2	VERIFICATIONS :.....	199
3.8	CALCUL D'UN TREILLIS.....	201
3.8.1	DIMENSIONNEMENT STATIQUE EN TRACTION ET EN COMPRESSION.....	201
3.8.2	VERIFICATION EN FATIGUE.....	201

3.8.3	CALCUL EN STATIQUE DES CORDONS D'ANGLES.....	201
3.8.4	VERIFICATION EN FATIGUE DES SOUDURES BOUT A BOUT ET D'ANGLE	201
3.9	CONCEPTION ET CALCUL D'UN APPREIL A PRESSION	201
3.9.1	CALCUL DE LA CONTRAINTE NOMINALE F	201
3.9.2	2/DEFINITION DE LA CATEGORIE DE CONSTRUCTION.....	202
3.9.3	3/CALCUL DE LA PRESSION D'ESSAI DE RESISTANCE.....	202
3.9.4	4/DETERMINATION DU Tk27	202
4	Fabrication et applications d'ingénierie	205
4.1	INTRODUCTION A L'ASSURANCE QUALITE DANS LES CONSTRUCTION SOUDEES ...	205
4.2	CONTROLE DE LA QUALITE EN FABRICATION	205
4.3	CONTRAINTE ET DEFORMATION EN SOUDAGE	206
4.3.1	LEXIQUE.....	206
4.3.2	PROPRIETE PHYSIQUES	206
4.3.3	LES DEFORMATIONS	207
4.3.4	LES CONTRAINTES RESIDUELLES	211
4.3.5	SEQUENCE DE SOUDAGE	212
4.3.6	TRAITEMENTS DE PARACHEVEMENT	212
4.3.7	LES TRAITEMENTS DE RELAXATION	213
4.3.8	LA RELAXATION MECANIQUE	213
4.3.9	RELAXATION PAR TTH	215
4.4	MOYENS DE PRODUCTION, GABARITS ET MONTAGE	216
4.5	HYGIENE ET SECURITE	216
4.5.1	CHALEUR	216
4.5.2	ELECTRICITE	216
4.5.3	RAYONNEMENTS	217
4.5.4	GAZ ET FUMEEES.....	217
4.5.5	LE BRUIT	217
4.5.6	LA SANTE DES SOUDEURS	218
4.6	MESURES, REGULARISATION ET ENREGISTREMENT EN SOUDAGE.....	218
4.7	END	218
4.8	ASPECTS ECONOMIQUES.....	218
4.9	REPARATIONS PAR SOUDAGE	218
4.10	APTITUDE A L'EMPLOI	218
4.11	ETUDE DE CAS CONCRETS.....	218

1 Procédés et matériels de soudage

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 de 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

1.2.1 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 Manual Arc
114	FIL FOURRE SANS GAZ / INNERSHIELD	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 avec fil électrode	Submerged Arc Welding
122	A.S.F. / SAW	Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre avec feuillard	Submerged Arc Welding
131	MIG / GMAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec fil électrode fusible	Metal Inert Gas or Gas Metal Arc Welding
135	MAG / GMAW	Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil électrode fusible	Metal Active Gas or Gas Metal Arc Welding
136	FIL FOURRE AVEC GAZ / FCAW	Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil électrode fourré	Metal Active Gas or Flux Cored Arc Welding with gas
141	TIG / GTAW	Soudage à l'arc en	Gaz Tungsten Arc

		atmosphère inerte avec électrode de tungstène	Welding
141 orbital	TIG ORBITAL / GTAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène orbital	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	ALUMINOTHERMIQUE / TW	Soudage aluminothermique	Alumino-Thermic Welding
72	VERTICAL SOUS LAITIER / ESW	Soudage vertical sous laitier	Electroslag Welding
73	VERTICAL SOUS GAZ / EGW	Soudage vertical sous gaz de protection	Electrogas Welding
751	LASER / LBW	Soudage par faisceau laser	Laser Beam Welding
76	FAISCEAU ELECTRONS / EBW	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

1.2.2 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**)

1.3.1 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

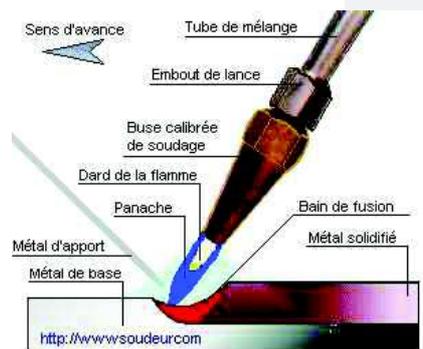
Gaz de combustion : Gaz combustible d'acétylène C₂ H₂ avec un gaz comburant O₂.

1.3.2 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.

1.3.2.1 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.

1.3.3 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 dé-oxydante)

Si $a < 1$ flamme carburant.(excès d'acétylène donc ↗ du carbone)

Si $a > 1,1$ flamme oxydante.

I	II	III	IV	
C_2H_2 et O_2	$C_2H_2 + O_2 = H_2 + 2C$ O+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 $H_2 + 1/2O_2 = 58$ Kca	$\Rightarrow \cong 300$ Kcal

$C_2H_2 \Rightarrow$ acétylène		$2CO \Rightarrow$ gaz réducteur $H_2 \Rightarrow$ gaz réducteur	$H_2O \Rightarrow$ vapeur d'eau	
--------------------------------	--	--	---------------------------------	--

1.3.3.1 Flamme neutre ou normale (réductrice):

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

1.3.3.2 Flamme oxydante:

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

1.3.3.3 Flamme carburante:

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

1.3.4 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

1.3.5 Différents types de chalumeaux pour le soudage :

Chalumeau haute pression : Utilisé avec ou sans aspiration

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

1.3.6 Détendeur

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

- Donner pression de détente régulière quelque soit pression de gaz à l'intérieure 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 monomètres doivent être remplacés dès hors service. Pour détenteur O₂, éviter toute trace d'huile ou de graisse sur tous les organes. Toujours dévisser vis de détente lors du montage sur bouteille neuve et après utilisation.

1.3.7 Mode opératoire :

1.3.7.1 - Sens du déplacement du chalumeau en soudage :

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

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

1.3.7.1.2 - 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

1.3.8 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

1.3.9 Comparaison des différents mélange de gaz :

OXYÉTYLENE	2840°C
OXYBUTANE	2830°C
OXYPROPANE	2830°C
OXYHYDROGENE	2430°C

OXYMETHANE	2730°C
------------	--------

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)

1.3.10 Hygiène et sécurité

- Risques de brûlures causées par les pièces elles-mêmes, projections de particules chaudes
- Les poly-traumatismes causés par le travail en hauteur sur échafaudages mal sécurisés
- Pb avec les fumées provoquées par produit de nettoyage, dégraissage, décapage

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 a 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)

1.5.1 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

1.5.2 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 (O₂) 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 (+)

1.5.3 L'anode

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

1.5.3.1 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
-

1.5.3.2 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 souder des matériaux peu émissifs avec une tension anodique très élevée (TIG et MIG)
- oxyder la surface du métal en MAG
- sous Flux à moins de 450 A
- meilleur taux de dépôt
- arrache les électrons à la pièce donc la désoxyde

1.5.3.3 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 à se mettre en boule
Le décapage suffisant pour les alliages légers mais en TIG elle sera exclusivement en tungstène pur

1.5.4 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
 - o gravité simple
 - o gravité avec force d'éjections
 - o gravité avec force de répulsion

Il existe 3 modes de transfert secondaires : le court-circuit contrôlé, la veine liquide et le courant pulsé

1.5.5 Les différents modes de transfert en soudage à l'arc

1.5.5.1 Electrode :

Rutile : pulvérisation axiale

Basique : globulaire,

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

1.5.5.2 MIG :

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

1.5.5.3 MAG :

Pas de pulvérisation avec CO² pur,

1.5.5.4 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 désamorce 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.

1.5.5.5 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).

1.5.5.6 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.

1.5.5.7 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.

1.5.5.8 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.

1.5.5.9 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

1.5.6 Le soufflage magnétique et la striction

Ces deux phénomènes sont dus aux forces périphériques appelées forces de LAPACE = Intensité²

1.5.6.1 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

1.5.6.2 Le soufflage magnétique

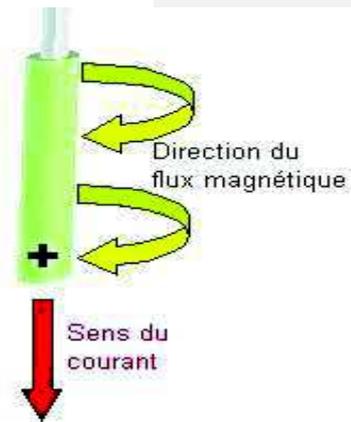
Le soufflage magnétique de l'arc est un phénomène physique rencontré lors du soudage d'**aciers au carbone non allié** ou **faiblement allié**, d'**aciers ferritiques** et d'**aciers austéno-ferritiques** (duplex et super-duplex) avec un courant de soudage continu (CC ou DC).

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

1.5.7 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 .

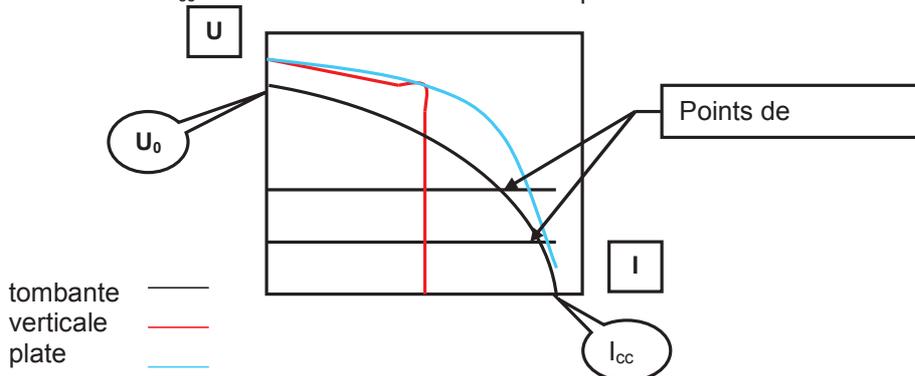
1.6 Sources de courant pour le soudage à l'arc

1.6.1 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 $U=0$



1.6.1.1 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 \uparrow la tension \uparrow l'intensité \downarrow
-

1.6.1.2 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 $\uparrow\downarrow$ la tension $\uparrow\downarrow$ l'intensité =

1.6.1.3 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 $\downarrow\uparrow$
Cette CES permet de réguler la fusion du fil électrode. En effet, si le fil fond trop vite, la longueur d'arc \nearrow . Donc l'intensité $\searrow\searrow\searrow$ et le fil refroidit et retrouve sa longueur initiale. Si le fil fond trop lentement, la longueur d'arc \searrow . Donc l'intensité $\nearrow\nearrow\nearrow$ et le fil chauffe plus, fond plus vite et retrouve sa longueur initiale

1.6.2 Les générateurs

1.6.2.1 les tournants

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

1.6.2.2 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

1.6.2.3 les transformateurs redresseurs triphasés

A 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 »

1.6.2.4 les sources a onduleurs

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

1.6.3 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

1.6.3.1 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

1.6.3.2 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 : N_2 , O_2 , H_2 . Elle permet aussi de stabiliser l'arc électrique

1.7.1.1 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
- Amorçage et stabilité de l'arc facilité

1.7.1.2 Hélium :

- gaz inerte plus léger que l'air
- bon conducteur de la chaleur

- augmente l'énergie de soudage
- modifie la forme du cordon (racine massive, excellente compacité, bon mouillage)

1.7.1.3 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

1.7.1.4 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

Gaz oxydant

1.7.1.5 Oxygène

On l'utilise pour souder plus vite car il fluidifie le bain de fusion 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 a grain fin
- améliore
 - o la stabilité de l'arc
 - o la mouillabilité
 - o fluidité du bain
 - o la température du bain
- diminue les projections

1.7.1.6 le Co₂

- gaz réducteur, mais carburant
- mouillabilité moyenne, racine massive, bonne compacité
- pur => pas de pulvérisation axiale
- utilisé pour les aciers non et faiblement alliés
- arc peu stable et projections

1.7.1.7 Gaz réducteur

1.7.1.8 Hydrogène :

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

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

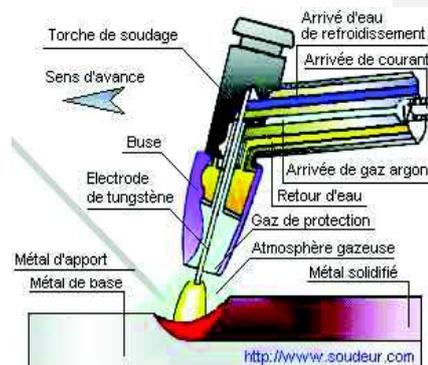
1.8 Introduction au soudage à l'arc sous protection gazeuse

1.9 Soudage TIG :141

1924 premier TIG USA et 1948 en France

1.9.1 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 à 1 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 utilisé pour les ép 0.5 à 08 mm, il peut être utilisé pour les pénétrations

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

1.9.2 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 $T^{\circ}\text{C}$ de volatilisation du matériau est supérieure à 3000°C (Le bain a une $T^{\circ}\text{C}$ de $\theta_f + 1000^{\circ}\text{C}$)

1.9.3 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 SAEE (sont + ou – compatible)

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 certains 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 intégrée 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 ⇒ HT ⇒ des perturbations radioélectriques.
- Utilisation d'un dispositif stabilisateur de tension
- Substitution d'un courant sinusoïdal par un courant carré.

1.9.4 les machines

- le générateur de courant
- tension a 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)
-

1.9.4.1 les électrodes

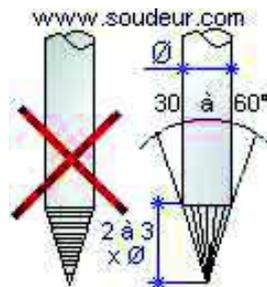
L'électrode doit pouvoir résister à la chaleur produite par l'arc (le tungstène fond à 3410°C +il émet beaucoup d'électrons) on le dope avec des oxyde Thorium de zirconium de lanthane ou de cérium (0.15 à 4.20 %)

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

1.9.4.2 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



Inconvénient

- beaucoup inclusion de tungstène dans la pièces

1.9.4.3 Le courant alternatif

Utilisé pour alu et ses alliages (sans décapage des pièces le soudage est impossible : alumine fond à 200°C et alu vers 660°C) . pour le 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

1.9.5 Les gaz

Composition chimique	Acier au carbone	Acier inox austénitique	Alu cuivre titane
Ar	x	x	x
He			x
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% H ₂ 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 a 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 Pour les aciers non alliés il n'est nécessaire mais améliore le profil et l'état de surface

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

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

1.9.6 Procédés dérivés

1.9.6.1 Le tig pulsé

- Utilise dans le cas ou 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

1.9.6.2 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

1.9.6.3 TIG fil chaud en automatique

1.9.6.4 TIG multi-cathode plusieurs électrodes

1.9.6.5 A-TIG

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

1.9.7 Hygiène et sécurité

Important risque de brûlures

Le TIG ne fait de fumée nocive mais attention au fumée des produits de décapage

Création de ozone aspiration obligatoire

L'argon est plus lourds que l'air il peut produire à des asphyxies

Rayonnement lumineux important surtout des infra rouge et réflexion multiples

1.9.8 Avantages et inconvénient

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 position	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	

1.10 Soudage MIG/MAG et soudage avec fil fourré

1.10.1 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

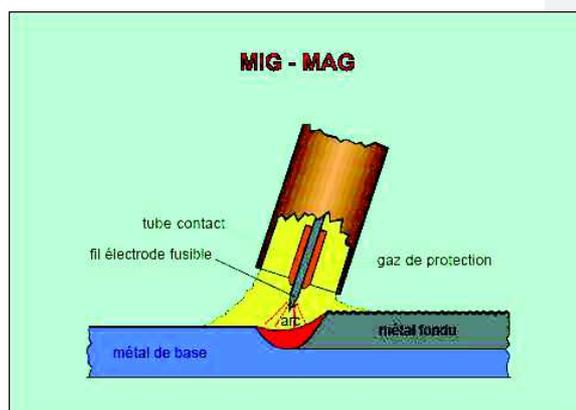
Désignation américaine : GMAW (Gaz Métal Arc Welding)

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 plate

1.10.2 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

1.10.3 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 ↑ = intensité ↑)

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.

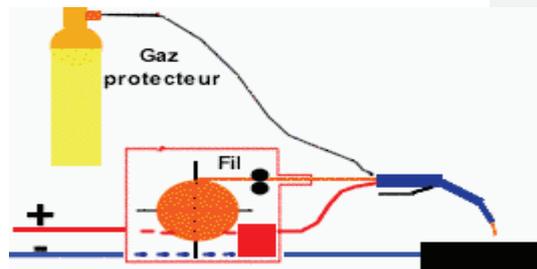
Dévidage séparé : le dévidoir est indépendant du poste, à utiliser quand le poste ne pas être mis à proximité du chantier.

- 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..



1.10.4 les différents régimes de transfert du métal :

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

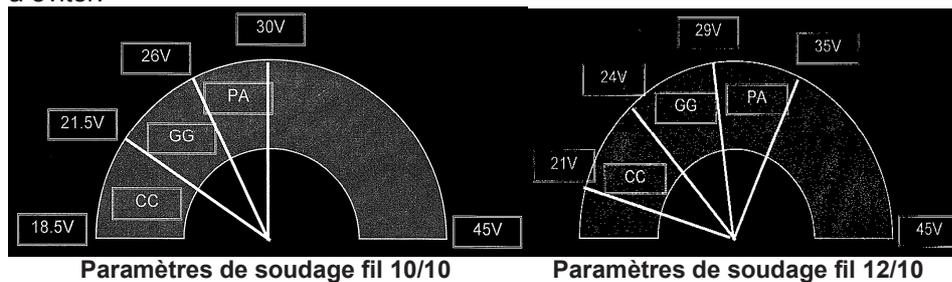
La tension et l'intensité (vitesse de fil) sont faibles, la goutte de métal fondu vient en contact du bain de fusion donc court-circuit ce qui conduit à une remontée de l'intensité et détachement de la goutte (projection importante), en général utilisé pour les passes de pénétration et en position. Sensible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

1.10.4.2 Transfert par pulvérisation axiale (spray arc): Impossible en Co² pur

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). A utiliser en général à partir de 5mm d'épaisseur, par contre qu'en passe de remplissage. Utilisable qu'en courant lisse

1.10.4.3 Transfert par grosses gouttes (globular) :

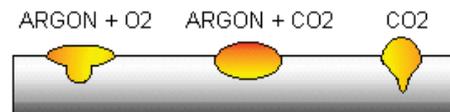
La tension et l'intensité ont un niveau intermédiaire entre les 2 régimes précédemment cités. Formation de grosses gouttes se détachant par gravité, mais leurs trajectoires aléatoires peuvent aboutir hors du chanfrein. Ce régime est donc à éviter.



1.10.4.4 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	Ar + CO ₂ , Ar+ O ₂ , Ar + CO ₂ + O ₂	Acier au carbone et inox austénitique
	Gaz actifs	C	CO ₂ , CO ₂ + O ₂	

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



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

1.10.4.5 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.

1.10.4.6 Paramètres opératoires :

1.10.4.6.1 Tension d'arc :

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

1.10.4.6.2 Intensité du courant de soudage :

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

1.10.4.6.3 La self :

Utilisée en court-circuit pour limiter les projections.

- Trop forte tendance au collage,
- Trop faible tendance plus de projections

1.10.4.6.4 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 contrôlé par le soudeur (environ 15 mm pour les fil standard).

1.10.4.7 Sens de soudage :

1.10.4.7.1 Soudage en tirant :

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.

1.10.4.7.2 Soudage en poussant :

Ce sens donnera une pénétration et une surépaisseur moins importantes, la vitesse de soudage sera plus grande car la visibilité du cordon est totale.

1.10.4.8 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

1.10.5 Les procédés dérivés

1.10.5.1 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 :

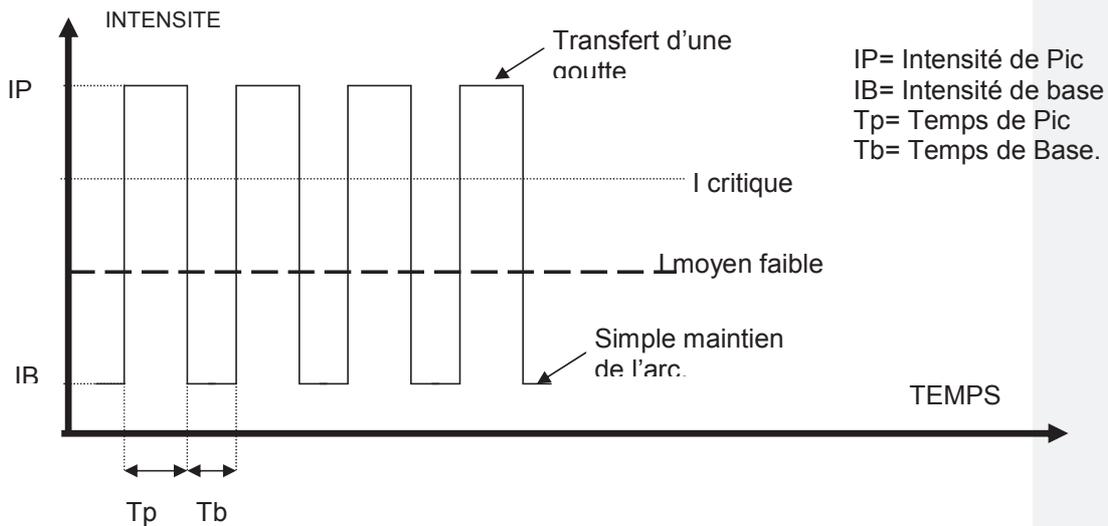
- Permet le soudage des alliages légers et des aciers inoxydables en faible épaisseur
- - Permet le soudage en position par la maniabilité du bain de fusion
- - Permet d'obtenir de beaux aspects de cordons, sans projections.
- -.Mais la mise au point des paramètres est délicate (Mode synergique préférable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



1.10.5.1.1 Soudage à 2 fils – 2 générateurs

On utilise 2 générateurs pulsés, synchronisés et décalés de $\pi/2$. Permet l'obtention de grandes vitesses de soudage (jusqu'à 350 Cm/min pour des épaisseurs inférieures à 6 mm).

1.10.5.1.2 Arc rotatif :

Lorsque l'on utilise des intensité supérieures à 350 A, l'arc se met à tourner sous l'effet des champs électromagnétique, la pénétration devient moins profonde mais plus large qu'en pulvérisation axiale. Soudage uniquement a plat

1.10.5.1.3 Court-circuit contrôlé :

On contrôle le courant, ce qui limite le nombre de projections et le risque de collage.

- **Adapté pour :** - Soudage tôles minces
- Exécution des passes de pénétration
- Rabotage des tôles

1.10.5.2 Guide de choix :

AVANTAGES :	INCONVENIANTS :
- Auto régulation (semi-auto)	Risque de collage en court circuit
Taux de dépôt environ de 2,5 à 4 Kg / heure	Peu recommandé pour les appareils à pression
Productivité importante	Projection nécessitant parfois un parachèvement
Vitesse de soudage 35 à 50 Cm/min (en manuelle)	Maintenance de l'installation (tube contact, gaine, encrassement de la buse)
Facteur de marche de 40%	
Soudage dans les 2 sens	
Pas de laitier	

12 mm : chanfrein en V ou en tulipe, si l'accès
Pour le soudage de l'aluminium, il est préférable, côté envers, de tomber la carre afin d'obtenir une forme de pénétration correcte.

1.11 Les principales caractéristiques des fils fourrés 136 137

1.11.1 Soudage à l'Arc sous protection de gaz actif avec fil - électrode fourré fusible

Désignation américaine : FCAW (Flux Cored Arc Welding)

Désignation numérique : 136

1.11.2 Soudage à l'Arc sous protection de gaz inerte avec fil - électrode fourré fusible

Désignation américaine : FCAW (Flux Cored Arc Welding)

Désignation numérique : 137

1.11.2.1 Principe :

Les fourrés sont constitués d'une enveloppe métallique remplie de poudres de différentes natures (métallique ou minérale) et tréfilés comme un fil classique. Le principe du soudage avec fil fourré est le même que celui du soudage MIG/MAG. L'alimentation se fait toujours en courant continu. Le gaz de protection est soit inerte ou activé. Les produits contenus dans la fourrure contribuent à

l'amélioration de la stabilité de l'arc, à la désoxydation du bain de fusion et à l'apport d'éléments d'alliage.

Certains fils fourrés déposent un laitier, d'autre non. Lorsqu'il y a un laitier, comme pour les électrodes enrobées, il peut être rutile ou basique. La polarité doit alors être adaptée à la nature du remplissage. Le soudage se fait toujours à droite, en tirant.

METHODE DE FABRICATION D'UN FIL FOURRE

<http://www.soudeur.com>



1.11.2.2 Domaine d'emploi :

A peu près identique à ceux des fils plein, mais avec plusieurs avantages :
Accroissement de la productivité de 20%

- Meilleure souplesse opératoire
- Excellentes caractéristiques mécaniques des dépôts
- Utilisation sans réticences pour les appareils à pression
- Utilisation recommandée pour constructions de qualité, sur tôles d'épaisseurs moyenne à forte.

Très utilisé aux USA et au Japon. Plus limité en France dû au coût du métal d'apport. (Comparable aux électrodes enrobées).

Mais en terme de productivité, + avantageux (même si le coût du gaz de protection est important).

1.11.2.3 Guide de choix :

AVANTAGES :	INCONVENIANTS :
Préparation simplifiée	Coût du métal de base
Nombre de passes	Difficile à utiliser pour les passes de fond
Qualité du métal déposé	Laitier à éliminer
Productivité +20%	
Utilisation sur appareil a pression	

1.11.3 Soudage à l'Arc avec fil fourré sans gaz (Innershield)114

Désignation américaine : FCAW (Flux Cored Arc Welding, without gaz)

Désignation numérique : 114

1.11.3.1 Principe :

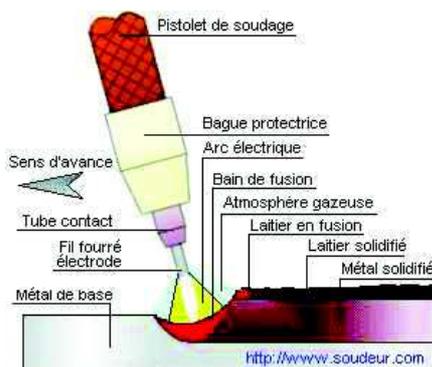
Principe

Identique au fil fourré avec gaz et laitier, mais le laitier est plus abondant que le procédé 136.

Comme pour le procédé 111, la protection du bain de fusion est assurée par la décomposition de la fourrure qui produit plusieurs effets : stabilisation de l'arc, désoxydant, émission de gaz pour protéger le transfert du métal et le bain de fusion, production de laitier pour protéger le métal fondu pendant le refroidissement, apport en éléments d'alliage.

Les fils fourrés sans gaz de protection sont des feuilards remplis de flux de différentes natures (métallique ou minérale) roulés et tréfilés. Différent diamètres : 1.6 – 1.8 – 2.0 – 2.4 – 2.8 – 3mm. On utilise des fils de diamètre supérieur à 2 mm en général.

Le générateur utilisé est un générateur multiprocess asservi en tension (cf. câble de mesure de tension à l'arc supplémentaire sur torche et retour masse). Ce générateur a une CES verticale avec une tension corrigée en fonction de la mesure de la tension à l'arc. Le mode de transfert est uniquement globulaire.



1.11.3.2 Constitution :

Ses rôles sont à peu près les mêmes que l'enrobage de l'électrode enrobée. Il facilite l'amorçage et la stabilité de l'arc, il assure la protection gazeuse du bain de fusion et produit un laitier qui assure la protection du cordon de soudure lors du refroidissement. La seule différence, c'est que le fourrage n'assure pas le guidage de l'arc.

En effet, le fourrage est à l'intérieur et lors du soudage, c'est l'enveloppe externe qui se consomme avant le fourrage. Ceci engendre des projections plus importantes.

1.11.3.3 Élément d'addition :

Rôles	Principaux éléments d'addition
Désoxydant	Le manganèse et le silicium ; l'aluminium et le titane complètent l'action du Mn et Si
Oxydant	Quartz, silicates de fer.
Réducteur	Ferromanganèse, ferro-titane.
Ionisation de l'arc	Sels de sodium et de potassium.
Dé nitrurant	Ferro-silicium, cellulose, talc, titane, aluminium.
Fondant	Rutile (TiO ₂) silice, spath, fluor, cryolithe.
Amorce et entretien de l'arc	Oxyde de fer, et oxyde de titane.
Pénétrant	Cellulose (la formation d'hydrogène sous l'effet de l'arc augmente la température dans l'arc électrique)
Fluidifiant	Oxyde de fer.
liant	Les silicates de soude et de potasse servent à lier les éléments. Le kaolin participe à la formation du laitier

1.11.3.4 Rôle du flux :

1.11.3.4.1 Rôle électrique :

Les poudres contenues dans le feillard vont permettre l'élaboration de gaz qui, en s'ionisant, favorise l'amorçage de l'arc et sa stabilité

1.11.3.4.2 Rôle physique :

Le flux au moment de sa fusion produit un laitier qui enveloppe les gouttes de métal liquide et augmente la tension superficielle du bain permettant ainsi avec une grande majorité des fils le soudage en position.

1.11.3.4.3 Rôle métallurgique :

Le rôle du flux est d'une part de protéger le métal liquide de l'air pendant le transfert dans l'arc par la création de gaz et de laitier (protection contre l'azote et l'oxygène ...) et d'autre part, introduire dans le bain des éléments d'alliage (manganèse, nickel...) et des désoxydants et dé nitrurants tels que aluminium, manganèse, titane, zirconium, etc..

1.11.3.5 Domaine d'emploi :

Acier faiblement alliés avec $Re < 360\text{Mpa}$ et quelques Acier inox.

Construction métalliques et navale car : travaux extérieur et taux de dépôt élevé

Il est très intéressant sur chantier où l'approvisionnement en gaz est difficile (moins sensible au vent).

Pour souder à plat, on utilise la polarité indirecte. Pour souder en position on préférera une polarité directe

1.11.3.6 choix du fil:

1.11.3.6.1 En fonction de :

- La nuance du métal de base,
- Les caractéristiques du métal déposé,
- La position de soudage
- L'épaisseur de l'assemblage.

1.11.3.6.2 Deux catégories de fil :

- Les fils mono passes destinés au soudage des tôles minces, ép. ≤ 4mm
- Les fils multipasses destinés au soudage des tôles épaisses.

1.11.3.7 Etuvage des fils :

Ne jamais étuver un fil fourré innershield.

AVANTAGES :	INCONVENIANTS :
Préparation simplifiée	Fumée abondante
Installation robuste	Gamme étroite de produits d'apport
Soudage en extérieur	Laitier à éliminer
	Maintien du stick out

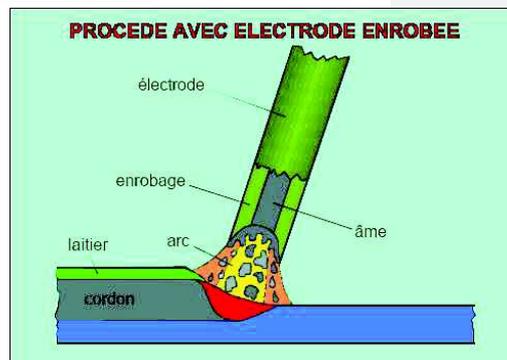
1.12 Soudage manuel avec électrodes enrobées :111

les postes ont une courbe caractéristique statique verticale en courant continu avec tension à vide 65 V mini

L'arc électrique qui jaillit entre l'électrode et la pièce à souder entraîne une source de chaleur qui assure la fusion simultanée des bords des pièces à assembler et du métal d'apport.

Le métal d'apport (ELECTRODE) est constitué par :

- Une âme
- Un enrobage incluant des éléments d'alliages



Le **bain de fusion** est protégé par des gaz provenant de la décomposition de l'enrobage. Le métal fondu est protégé par des gaz et du laitier provenant de la décomposition de l'enrobage.

- Très facile de mise en œuvre.
- Procédé de soudage polyvalent, retrouvé dans tous les types d'industrie (chantier, nucléaire, mécano soudage, chaudronnerie, plates-formes pétrolières, pétrochimie, artisanat...).
- Fortement concurrencé par d'autres procédé + facilement automatisables ou ayant des taux de dépôt + importants (MAG-FF), il est encore fortement utilisé. Notamment dans les cas de soudabilité difficile et/ou sur des ensembles nécessitant une haute qualité de soudure.
- Premier procédé utilisé pour ceux qui décident de souder, apprentissage simple.
- Sera dédaigné par certaines industries (automobile) car soudage lent et avec laitier

1.12.1 Les différents types d'électrodes

Constitution d'une électrode classique :

- - L'âme : fil métallique plein de nature voisine du métal de base (aciers non alliés et inoxydable), exception pour le soudage des fontes (âme en Ni).
- - L'enrobage : entoure l'âme sur toute la longueur exceptée la partie terminale pour assurer un bon contact électrique avec le porte-électrode. L'extrémité opposée est meulée pour permettre le court-circuit avec la pièce et faciliter ainsi l'amorçage. Il est constitué de matières minérales ou organiques.

1.12.2 Rôle de l'enrobage :

- **Rôles électriques** : à froid, il est isolant et donc protège le soudeur de l'électrisation et contient des produits émissifs (oxydes et carbonates) favorisant amorçage et la stabilité de l'arc.

Rôles mécaniques :

- **Guidage de l'arc et du métal d'apport** : la fusion de l'enrobage étant légèrement en retard à celle de l'âme, il se forme un cratère qui guide le transfert des gouttes vers le bain de fusion dans l'arc électrique.

- **Maintien du bain de fusion** : le laitier se solidifie plus vite que le métal fondu, constituant pour le métal fondu une sorte de moule qui l'empêche de s'affaisser. Il améliore la forme du cordon et favorise le raccordement progressif au métal de base.
- **Souffle de l'arc** : une partie de l'enrobage se volatilise sous forme de gaz chassant l'air ambiant tout en exerçant une pression sur le bain de fusion (possibilité de souder en position).

Rôle métallurgique :

- **Protection contre l'oxydation** : les gaz produits par l'enrobage protègent les gouttes de métal liquide lors du transfert et le bain de fusion. Sous sa forme de laitier, l'enrobage protège le métal fondu lors du refroidissement.
- **Désoxydation du bain de fusion** : les éléments réducteurs (Si, Mn) présents dans l'enrobage captent l'O₂ présent dans le bain de fusion. Les oxydes ainsi formés sont éliminés dans le laitier.
- **Élimination du soufre et phosphore** : les carbonates présents dans certains enrobages captent le S et le P (présents dans certains aciers) qui sont néfastes dans le bain de fusion.
- **Compensation de la volatilisation** : Mn, Si, Cr (perdu lors du transfert de l'arc) peuvent être ajoutés dans l'enrobage (sous forme de ferroalliages), ainsi le métal déposé peut ainsi retrouver sa composition initiale.
- **Apport volontaire d'éléments** : principe identique à celui de la compensation, sauf que l'on ajoute d'autres éléments d'alliage (Cr, Ni, Mo,...) et on agit ainsi sur la composition chimique du métal déposé qui peut alors s'éloigner de beaucoup de celle de l'âme.
- **Apport volontaire de fer** : l'addition de poudre de fer dans l'enrobage permet d'augmenter le taux de dépôt. Le rendement de ces électrodes (haut rendement) peut atteindre 250%.

- **Diminution de la vitesse de solidification** : le laitier ralentit la solidification afin d'améliorer la compacité du dépôt par un meilleur dégagement des gaz.
- **Diminution de la vitesse de refroidissement** : après solidification, la présence du laitier ralentit le refroidissement du cordon, évitant le risque de formation de structures fragiles

Attention : laitier mince = cordon bombé ; Laitier épais = cordon plat, Sauf pour les haut rendement dont l'enrobage est rempli de métal, les électrodes sont plus résistive que les autres donc elles s'échauffent plus vite et la vitesse de soudage augmente.

1.12.2.1 Différents types d'enrobage : COBRA

1.12.2.1.1 C enrobage cellulosique :

- Polarité directe courant continu et courant si la tension à vide est élevée 70 à 90 volts
- Projections et fumées importante
- Soudages en toutes positions surtout en vertical descendant
- vitesse fusion élevée, arc pénétrant (chanfrein fermé)
- laitier peu abondant et facilement détachable

1.12.2.1.2 O enrobage oxydante :

1.12.2.1.3 B enrobage basique :

L'enrobage basique des électrodes contient des quantités notables de carbonates ainsi que des sels de fluorures (savons). Le caractère métallurgique de cet enrobage est donc basique. Ces électrodes donnent une quantité moyenne de laitier dense et vitreux.

le métal déposé est très résistant à la [fissuration à chaud](#) et à froid

le dépôt est de haute qualité donc de bonne ténacité

il est possible de souder en toutes positions sauf en verticale descendante

- Polarité inverse en continu ou en alternatif tension à vide 70 v

- Electrodes à étuver (teneur en hydrogène très faible) donc risque de fissuration à froid faible.(étuvage suivant spécifications fabricant exemple : 2h à 350°)+ conservation au chaud
- Soudage en toutes positions **sauf au plafond**
- Laitier dense et vitreux (moins épais que les rutiles).
- Dépôt de haute qualité (bonne ténacité)
- Très sensible à l'humidité
- Tension a vide 70 à 90 volts

1.12.2.1.4 R enrobage rutile ou RC rutile toutes positions RR rutile épais

- enrobage a l'oxyde de Titane TIO₂
- Polarité directe en continu ou alternatif avec une tension a vide > a 45V
- Polarité directe en continu pour RR
- Toutes positions sauf verticale descendante
- Tps d'amorçage faible
- Laitier auto détachable
- Bonne vitesse de fusion
- Bonne caractéristique mécanique pour les aciers non alliés
- Deux fois moins cher que la basique
- Tension à vide 50 volt, toutes positions, caractéristiques moyenne.
-

1.12.2.1.5 A enrobage acide :

- Polarité directe
- Très bel aspect de cordon
- Soudage à plat uniquement(risque de fissuration si utilisée en d'autres positions)

1.12.2.1.6 RC enrobage cellulosiques au rutile

RA enrobage acides au rutile
RB enrobage basiques au rutile

1.12.3 La désignation normalisé

E 423 B 35 H5	
E	Electrode enrobée
42	La limite d'élasticité Re mini 420 MPa
3	L'énergie de rupture par flexion par choc 47 J à -30 °c
B	Basique
35	Le rendement et le type de courant CA CC
5	Toutes positions

1.12.4 Particularité EE à la poudre de fer

Poudre de fer contenu dans l'enrobage, permet d'augmenter le rendement de l'électrode, taux de dépôt supérieur à 120 % Ht rendement : 250 %

1.12.5 Avantage et inconvénients des électrodes basiques

Avantages :

le métal déposé est très résistant à la fissuration à chaud et à froid
le dépôt est de haute qualité donc de bonne ténacité
il est possible de souder en toutes positions sauf en verticale descendante

Inconvénients :

très sensibles à l'humidité, elles doivent donc être séchées avant utilisation (2 h à 350°C)
afin d'éviter les porosités, les électrodes enrobées doivent être conservées dans des endroits secs.

1.12.6 Avantages et inconvénient

Avantages	Inconvénient
Faible coût de l'installation	Taux de dépôts faibles 1 Kg/h pour R et pour RR>3Kg/h
Facilité de mise en oeuvre	Faibles facteur opérationnel 30%
Vaste domaine de produits de soudage	Présence de laitier
Vaste domaine d'utilisation	Former des soudeur

Dépôt de qualité	Vitesse de soudage 15 à 30 cm /min

1.12.7 Paramètres du soudage SAE

- Choix du type d'enrobage → en fonction du travail à effectuer
- Choix du diamètre de l'électrode → en fonction des conditions du travail à effectuer
- Choix de la polarité : en général polarité directe (- à électrode) → meilleure gestion pénétration
polarité inverse (+ à électrode) → meilleur taux de dépôt.
- Intensité de soudage : $I = 50 \times (\text{Ø de l'électrode} - 1)$
- Condition d'étuvage et de conditionnement

1.12.8 Hygiène et sécurité

- Risque de brûlure causée par les pièces elles-mêmes, projection de laitier et de particules chaudes (meulage)
- Accident oculaire causé par une mauvaise protection (NF EN 175)
- Les poly-traumatismes causés pas travail en hauteur sur échafaudages mal sécurisés
- Pb avec les fumées (abondantes parfois) ,également provoquées par les produits de nettoyage, dégraissage.
- Risque d'électrisation
- Rayonnement lumineux riche en infrarouge et ultraviolet (traumatisme irréversible pour l'œil)

1.12.9 Performances

- Coefficient de dépôt (ISO 2406 «A81 306») = 0,16 g/A/min
- 1 à 2.5 kg/h et > 3 kg/h pour les + grosse électrode à haut rendement
- Vitesse de soudage à plat en remplissage: 15 à 30 cm / min
- Facteur de marche opérationnel: 25 à 30 % (Rapport du tps (arc allumé) / rapport de présence sur chantier)

1.13 Soudage sous flux en poudre N°121 122 125

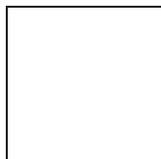
1.13.1 Désignation normalisé

Avec fil électrode	121
Avec électrode bande	122
Avec fil fourré électrode	125

1.13.2 Le principe

L'énergie de soudage est produite par le passage d'un courant électrique entre l'électrode fusible et la pièce à souder, au travers d'un milieu constitué par un laitier résultant de la fusion d'un flux en poudre recouvrant l'extrémité du fil, l'arc et le bain de fusion.

Il s'utilise avec un ou plusieurs fils nus ou feuillard fusibles. Il n'est utilisé qu'en automatique, avec un guidage de la tête de soudage assuré par une potence ou un banc de soudage.



Domaine d'emploi

- Principalement en soudage des aciers ferritiques et austénitiques.
- Avec une forte pénétration (10 mm) et une haute productivité, le destine aux fortes épaisseurs (> 5 mm). Ex : Tôle de 15 mm bout à bout jointifs chanfreinée soudée en 1 passe.
- Avec une pénétration sûre, sa bonne vitesse de soudage, sa qualité de dépôt et l'aspect des cordons, on le trouve également sur des épaisseurs + faibles (≥ 2 mm). Ex : Bouteille de gaz comprimé (butane/propane). Préparation en bords soyés ou latte support.
- Utilisé pour la réalisation des revêtements déposés par soudage, avec multi fils ou feuillard.

- **Principale utilisation** : charpente métallique, construction navale, grosse chaudronnerie.

Composition d'une installation

Source de courant

- Générateur de courant proche des autres procédés, mais spécifique car il doit permettre le réglage séparé de la tension et de l'intensité.
- Générateur à courant alternatif issue des transformateurs monophasés.
- CES transformateurs monophasés : **plongeante**
- **$I \leq 450 \text{ A}$** : transformateur redresseur de CES **plate**, pour profiter de l'autorégulation de l'arc comme en MIG/MAG. La vitesse de fil est asservie à l'intensité. Grande facilité d'amorçage et grande stabilité de l'arc, même pour de faibles densités de courant.
- **$I \geq 450 \text{ A}$** : transformateur à CES **plongeante ou verticale**. Le réglage de l'intensité est indépendant et la tension est asservie sur la vitesse d'avance du fil.
- Intensité fonction des travaux à exécuter et \varnothing du fil utilisé.
- → En mono fil : $250 < I \leq 500$
- → En multi fil ou feuillard : $700 \leq I \leq 1500$
- Tension à vide générateur comprise entre 50 et 70 V.
- Pour le soudage en courant continu, la polarité dépend du flux. En courant alternatif if souder avec un minimum de 450 A. Au-dessous, l'arc devient très instable ou nécessite des conditions particulières d'utilisation (tension d'arc élevé, préchauffage pièce)
 - $I \geq 1200 \text{ A}$: courant alternatif pour limiter les effets néfastes du soufflage magnétique.

Boîtier de commande et régulateur

Il alimente le moteur de dévidage car il contient un régulateur électronique.

Il contrôle la vitesse de fil, commande l'électrovanne d'arrivée de flux. Il présente un ampèremètre et un voltmètre. Une télécommande de réglage de U et I du générateur peut exister en option.

Tête de soudage

Elle comprend :

Groupe moto régulateur à vitesse réglable : vitesse constante car elle fixe la vitesse du fil.

- Tube contact pour arrivée de courant
- Tube arrivé du flux pouvant être concentrique au tube contact
- Optionnellement, dispositif de palpation ou de suivi de joint
- Optionnellement, oscillateur avec support de bobine de fil ou oscillateur linéaire.

Automate de soudage

Procédé essentiellement automatique, donc il est nécessaire de faire bouger soit :

- → La tête de soudage (avec potences, bancs de rabotage, chariots sur poutre...)
- → La pièce à souder (avec vireurs, positionneurs, mandrins motorisés, tours de soudage...)

Aspirateur à flux

Plusieurs types existants :

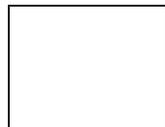
Les plus simples sont constitués d'un aspirateur. L'excédant de flux est mélangé avec des morceaux de laitier solidifié, nécessitant le triage. Certains permettent le recyclage du flux.

1.13.3 Paramètres de soudage et influence

En mono fil; les résultats dépendent de l'**intensité**, de la **tension** d'arc, de la **vitesse de soudage**, de **Ø du fil**, de la **polarité** et du **stick-out**.

1.13.3.1 Intensité

La pénétration ↗ si l'intensité ↗, mais peu influant sur la largeur et la surépaisseur du cordon.



1.13.3.2 Tension d'arc

Si la tension ↗, la largeur du cordon, la consommation de flux et le risque de caniveaux ↗



1.13.3.3 Vitesse de soudage

Si v ↗, le cordon devient étroit et la pénétration ↘.



1.13.3.4 Ø du fil

Si les autres paramètres sont constants, la pénétration ↗ quand le Ø du fil ↘.

1.13.3.5 Polarité

En CC, on soude en polarité indirecte. Mais si on se place en polarité directe, la pénétration ↘, la stabilité de l'arc est moins bonne mais la vitesse de fusion et le taux de dépôt ↗.

1.13.3.6 Longueur libre de fil (stick out)

Elle est de 5 à 7 fois le Ø du fil. Si la longueur ↗, la pénétration ↘, l'arc est moins stable mais le taux de dépôt ↗.

1.13.4 Amorçage de l'arc

Si la CES est plate, pas de problème, I_{CC} est suffisant pour un amorçage immédiat. Si la CES est plongeante, il faut un artifice pour l'amorçage : soit un démarreur HF, soit un lit de paille de fer qui volera à l'amorçage de l'arc. Sinon, on peut démarrer à la volée en mettant le fil en contact, puis en démarrant l'avance du chariot et en mettant le courant.

1.13.5 Nature et utilisation du flux

Ils sont en général composés d'oxydes de manganèse, de silicates de chaux complexes, d'alumine, de magnésie, de rutile et de fluorure de calcium. Ses propriétés sont les suivantes :

- Conduction du courant à l'état fondu
- Protection du bain de fusion par la création d'une atmosphère gazeuse
- Mouillage
- Modification de la composition chimique du métal fondu par l'ajout d'éléments d'alliage
- Action sur la forme du cordon de soudure
- Protection du cordon de soudure lors du refroidissement par le laitier (refroidissement lent)
- Scorification des oxydes de fer

Deux familles de flux principales :

1.13.5.1 Flux fondus

Mélange de produits minéraux fondus au four électrique, coulés sur sole refroidie, concassés, broyés et tamisés.

Le choix de la granulométrie dépend : du **type de flux**, de l'**intensité** et de la **forme du joint**.

- → Granulométrie fine :
- favorise le mouillage (influence l'aspect du cordon)
- pénétration moindre
- facilite le soudage en angle avec une forte gorge
- consommation de flux plus importante
- meilleur rendement thermique (moins de pertes de chaleur)
- → Granulométrie grosse : dégazage plus facile que la granulométrie fine

Caractéristique du flux fondu : aspect vitreux, contient peu d'eau, très homogène, bon au recyclage, peu de poussières, admet du soudage avec forte intensité (1400 A avec un fil). En général, ce type de flux est utilisé lors du soudage avec un faible taux d'hydrogène. L'étuvage est nécessaire en fonction des prescriptions du fabricant.

1.13.5.2 Flux agglomérés

Agglomération de produits minéraux et poudre métallique au moyen de liant, puis cuit pour séchage.

Granulométrie : d'un seul type 1400-200. Etuvage parfois nécessaire (200°/2h ou 400°/1h).

Caractéristique : grain compact, possibilité d'apport de ferroalliage. Fusion plus douce et forme du laitier facilement détachable, même en fond de chanfrein.

1.13.5.3 Influence épaisseur couche de flux

Suffisante pour assurer bonne protection du bain de fusion liquide, éviter les projections et les arcs visibles. Le lit du flux arrivera au dessus du tube contact. Elle joue sur le rendement thermique. Plus l'épaisseur de flux est importante, mieux le transfert de chaleur s'effectue.

1.13.5.4 Choix du couple fil/flux

En général, on ne peut pas dissocier les couples fil/flux. On le choisit en fonction de :

- La nuance de la tôle
- Le nombre de passes
- La préparation des bords
- Le procédé de soudage (énergie, mono fil, bi fils ...)

- Les traitements thermiques (post-chauffage)

1.13.6 Procédés dérivés

- Soudage avec 2 fils fins ou auto-plurial ou bi-fils fins : deux fils l'un derrière l'autre ou l'un à côté de l'autre afin d'augmenter la vitesse d'exécution.
- Soudage avec apport de fil chaud : apport à l'avant du bain de fusion d'un fil supplémentaire chauffé proche de la fusion par effet joule (courant \approx pour \simeq soufflage magnétique) afin d'augmenter le taux de dépôt.
- Rechargement par FEUILLARD : rechargement par feuillard de 30 ou 60 ou 120mm de large en polarité directe en courant continu. Le feuillard est de même nature que le MB ou de nature différente pour le revêtement inox.

1.13.7 Hygiène et sécurité

Peu de risques, pas de fumée, pas de rayonnement.

1.13.8 Performances

Coefficient de dépôt : 2,5 à 12 kg/h avec un maxi de 18 kg/h.

Vitesse de soudage à plat en remplissage : 2,5 à 12 cm/min avec un maxi de 300 cm/min.

- Facteur de marche opérationnel : 70% (temps arc allumé / temps chantier)



Rappels :

Investissements	30 à 120 KF
Matériaux soudables	Tous les aciers, Nickel
Ep. Courantes	A partir de 5 mm. Permet d'obtenir des pénétrations de 10 mm
Caractéristique du générateur	Jusqu'à 450 A caractéristique plate (en Courant Continu) après caractéristique plongeante
Types de courant	Courant continu, polarité suivant type de flux Courant alternatif pour les fortes intensités

Tension à vide mini U_0	Courant continu: 50 à 70 V / Courant alternatif: 70 à 80 V
Tension de soudage U_2	22 à 40 V $\Rightarrow U_2 = 14 + 0,04xI_2$ ou $U_2 = 20 + 0,04xI_2$
Intensité de soudage I_2	Courant continu: 200 à 600 A et jusqu'à 1500 pour revêtements Courant alternatif: 450 à 1500 A
Stick out	5 à 8 fois le \varnothing du fil
\varnothing les + usités	1,6 – 2,4 – 3,2 – 4 – 5 – 6,3
Rendement (%)	98
Facteur de marche opérationnel (%)	70
Vitesse linéaire de soudage	Usuellement 2,5 à 12 cm/min Maximum: 300 cm/min
Taux de dépôt Gaz	Usuellement 2,5 à 12 kg/h, maximum 18 kg/h
Avantages	Taux de dépôt élevé, bel aspect du cordon, excellente caractéristique mécanique (flux basique)
Inconvénient	Soudage à plat uniquement Suivi de joint difficile Travail en automatique uniquement
Hygiène et Sécurité	Peu de risque, pas de fumée, pas de rayonnement
Application	Charpente, mécano soudage, offshore, gros tube, appareils à pression, revêtement sur les grandes surfaces

1.14 Soudage par résistance N°21.22.23.24.25

1.14.1 Désignation normalisé

Soudage par résistance par point	21
soudage a la molette	22
Soudage par bossage	23
Soudage par étincelage	24
Soudage en bout par résistance pur	25

1.14.2 Le principe et résistance

Les pièces à assembler sont superposées et sont serrées localement entre 2 électrodes d'alliage de cuivre. C'est l'**accostage**. L'ensemble pièces/électrodes est

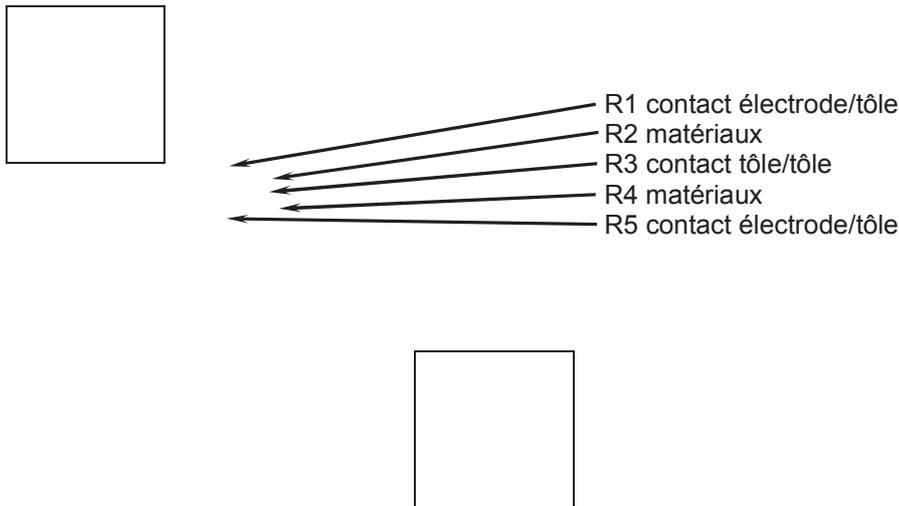
traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de la T° par effet JOULE et la fusion localisée des pièces dans la zone de positionnement des 2 électrodes. La loi de JOULE : $W=R \cdot I^2 \cdot t$ avec I qui crée le point et t qui le fait grossir. C'est la formation du **noyau** et le **soudage**. La continuité métallique est obtenue par l'application simultanée d'un passage de courant électrique et d'un effort de **forgeage**. L'effort est appliqué aux électrodes de la machine, dont le rôle est aussi de véhiculer le courant électrique et d'évacuer les calories. Le courant circulant entre les électrodes est freiné par une résistance R . Outre les résistances intrinsèques des électrodes, la résistance est constituée de 5 résistances s'additionnant:

- R_1 , R_3 et R_5 : résistances de contact
- R_2 et R_4 : résistances pures ou intrinsèques des pièces à souder

Chaque résistance délivre une énergie calorifique calculée suivant :

$$W=W_1+W_2+W_3+W_4+W_5$$

Le point de soudure se fera entre les 2 pièces seulement si R_3 est la plus grande des résistances, le cas normal. Si ce n'est pas le cas, la soudure apparaîtrait à l'endroit de la résistance la plus élevée donc en dehors de l'interface entre les 2 tôles. Donc R_3 devra être tjrs la + grande résistance. Mais comme R_3 diminue lors de la réalisation du point et que R_1 et R_5 augmentent avec l'échauffement et la dégradation des électrodes. Dès que R_1 et R_5 sont proche de R_3 , il faudra arrêter le soudage et remettre en état les électrodes.



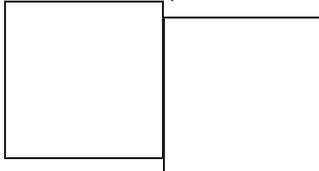
1.14.3 Influence des résistances de contact et des résistances pures

Une résistance de contact est plus importante qu'une résistance pure. Elle dépend de la nature du matériau (dureté, résistivité), état de surface (rugosité, traitement,

oxyde), de la T° , et surtout de l'effort appliqué par les électrodes. Elle varie également avec l'effort.

Pour avoir la création du noyau, il faut apporter plus d'énergie que la pièce ne peut en dissiper. Il faut donc fournir une puissance $>$ à la puissance calorifique ($P = R \times I^2$). Si l'effort \nearrow , $R_3 \searrow$.

La résistance pure est déterminée par :



Avec :

- ρ : résistivité du métal, constante du métal ($\mu\Omega/\text{cm}$)
- L : longueur de résistance (ép. de la pièce en cm)
- S : section de la partie active de l'électrode (en mm^2)
- ρ_0 résistivité de la pièce à 20°C
- α le coefficient de dilatation linéaire du matériau
- θ la température considérée

1.14.4 Constitution d'un point de soudage

- Au début, l'échauffement est prépondérant au niveau de R_3 donc on a une élévation locale de la T° due à l'effet JOULE.
- Rapidement, la chaleur engendrée provoque une augmentation des résistances des tôles R_2 et R_4 dans zone de contact. Cela favorise formation d'un petit volume de métal fondu.
- La chaleur se propage, contribuant au développement de la ZF constituant le noyau. Ce noyau est entouré de métal froid appelé **creuset plastique** se comportant comme un moule froid et des électrodes en contact avec tôles
- En phase plasticité, électrodes pénètrent dans la peau des tôles en laissant une empreinte : **indentation**.
- Après l'arrêt du courant, le creuset plastique refroidit très rapidement entraînant en fin de solidification une retassure.

Ensuite on a une phase de forgeage (effort maintenu ou accru durant le refroidissement) qui permet de limiter ces défauts et d'affiner la qualité métallurgique du grain

1.14.5 Mécanisme de constitution du point

La machine constituer

- Le vérin
- Hydraulique
- Pneumatique
- moteur électrique
- le transformateur on soude en alternatif monophasé
- l'interrupteur électronique : utilisation des périodes (20 millisecondes)
- le séquenceur ou coffret de commande
- la durée de l'accostage
- la durée du cycle de soudage
- l'intensité de soudage
- la durée et la force de forgeage
- recuit
- intervalle entre deux points
- le dispositif de refroidissement

1.14.5.1 Les électrodes

ont 3 rôles important

- **Electrique** : elles doivent avoir une bonne conductibilité électrique, mais le cuivre pur est déconseillé car ses caractéristiques mécaniques sont trop faibles. Préférer les alliages de cuivre au chrome.
- **Mécanique** : elles doivent supporter mécaniquement les montées en pression. En effet, elles permettent l'accostage des pièces, le maintien du creuset plastique et le forgeage.
- **Thermique** : elles doivent limiter l'expansion du creuset plastique en évacuant les calories apportées par l'apport de l'énergie de soudage

1.14.6 les machines

1.14.6.1 PRESSES DE SOUDAGE

Les presses à souder par résistance sont des machines massives fixes. C'est donc la pièce qui se déplace pendant l'opération de soudage.

1.14.6.2 PINCES À SOUDER À TRANSFORMATEUR INCORPORE

Ce sont des machines autonomes ayant les mêmes organes que les presses à souder. Une partie de leur masse est supportée par un palan qui permet à l'opérateur de positionner les électrodes à l'endroit où il doit faire le point de soudure. Ce sont des machines plus fragiles que les presses. Elles sont limitées en puissance et ne peuvent faire qu'un point à la fois.

PINCES À SOUDER À TRANSFORMATEUR DEPORTE

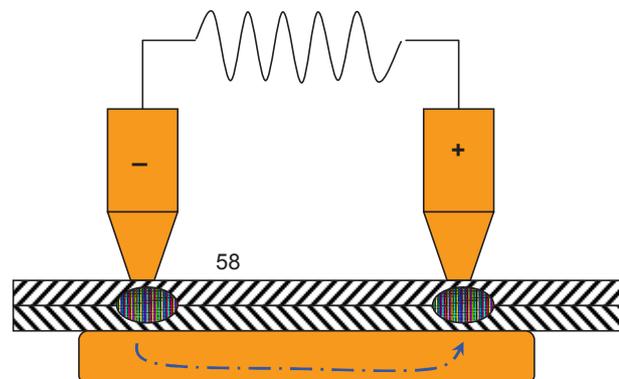
Utilisées sur des robots ou les machines automatiques. Le courant électrique secondaire doit être véhiculé par des câbles à basse impédance généralement. Les câbles sont refroidis par eau. Leur positionnement sur la machine doit être optimisé pour limiter l'impédance du circuit électrique secondaire.

1.14.6.3 MACHINE MULTI-POINTS

Elles permettent de réaliser plusieurs points en même temps. Elles sont de plusieurs types :

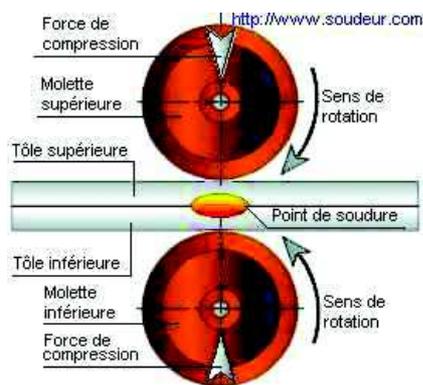
Machine double point parallèle : elle permet de faire 2 points en même temps, permettant de gagner du temps. La force d'**accostage** doit être égale pour une résistance de contact identique et l'**intensité** totale doit être égale à l'intensité de chaque point multipliée par le nombre de point à réaliser.

Machine double point série : elle diffère de l'autre procédé par le fait que les deux points sont réalisés par le même courant de soudage. Les pièces sont posées sur une table en cuivre pour permettre le passage du courant. Largement utilisé dans l'automobile.



1.14.6.4 MACHINE À SOUDER A LA MOLETTE (22)

Machine permettant de faire des points en continu. Les électrodes sont des roues en cuivre qui tournent à vitesse programmée. Suivant le cycle de soudage et la vitesse de cadencement des points, on peut obtenir des point imbriqués ou non.

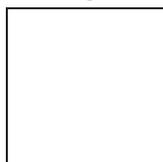


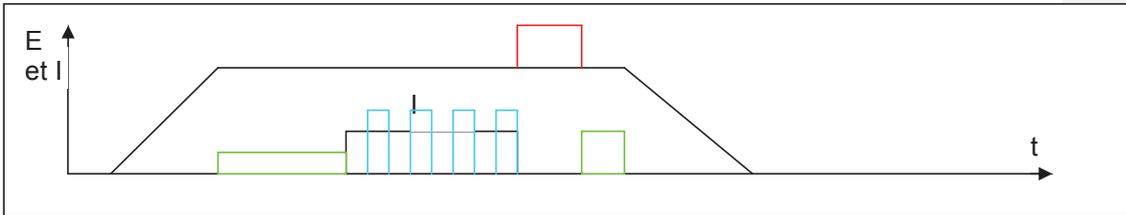
1.14.7 paramètres de soudage

- Taille du point : limitée à la zone chauffée par le courant électrique. A cause de la déperdition thermique, le \varnothing du point est toujours plus petit que le cylindre $\varnothing_{\text{électrode}} \times \text{hauteur}_{\text{pièces}}$. Le $\varnothing_{\text{électrode}}$ dépend de l'épaisseur : $\varnothing = 5x\sqrt{e}$ ou $\varnothing = 2e + 3 \text{ mm}$ pour l'acier.
- Intensité : se fait par le réglage de l'angle d'ouverture du thyristor. Cela détermine l'intensité efficace, donc l'énergie calorifique.

1.14.7.1 Réglage cycle de soudage simple

Trois phases : accostage – soudage – maintien (ou forgeage).





Le cycle classique est représenté en noir :

- Accostage pendant 15 périodes
- Soudure pendant 5 périodes à X%
- Maintien pendant 10 périodes

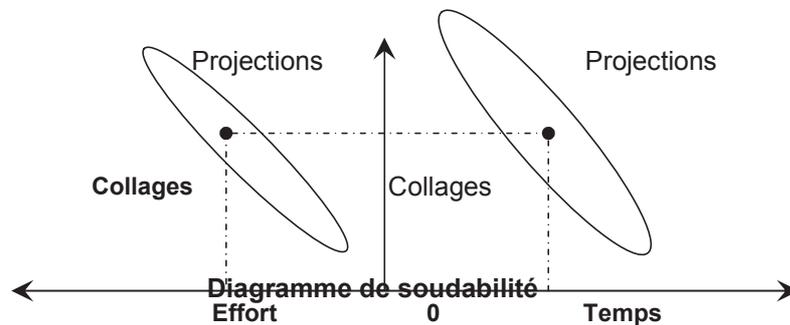
Le cycle **rouge** représente le forgeage avec une augmentation de l'effort en fin de cycle lors du refroidissement. En **vert**, c'est le pré et post chauffage.

Lorsque l'on veut réaliser un cycle de soudage long, il est préférable de réaliser des trains d'ondes de 5 périodes afin de favoriser la diffusion de la chaleur. C'est le cycle **bleu**.

1.14.7.2 Soudabilité

Elle est fonction des réglages d'effort, d'intensité et de temps. Trois types de points sont possibles :

- Point correct et dimension souhaitée
- Point collé, sans résistance mécanique
- Projections excessives



1.14.7.3 Aciers non alliés

Jusqu'à 0.18 % de carbone sinon post chauffage ep courant 0.5 à 3 mm
HLE idem précédent mais + temps+ effort+ intensité
Inox

1.14.7.4 Ferritique au chrome

pré et post chauffage + 1 cycle + long
Austénitiques soudent avec temps court et maintient long

Martensitiques ne se soudent pas sans TTh global après soudure

1.14.7.5 Aciers alliés

Fer a béton en croix et bout a bout

Corten « cuivre phosphore » possible malgré l'effet trempé

Acier décolletage déconseillé

1.14.7.6 Aciers revêtu

- Zingués et galvanisés
- Attention épaisseur de zinc (3 à 7 µm) et de galva (20 à 30µm)
- Electrode détériorer par le zinc
- Plombées se soudent bien
- Peinte ou plastifie idem avec temps court
- Etamées idem que les tôles zingués
- Bi métalliques possible mais il faut que
- La résistance de contact
- La résistivité d'une pièce supérieur a l'autre
- Dispersions des calories

1.14.8 soudage par RESISTANCE PAR BOSSAGE

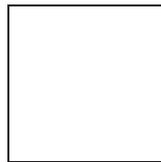
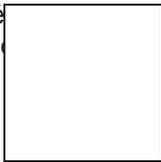
AVANTAGES	INCONVENIENTS
Souder plusieurs bossages en un cycle	Puissance élevée des machines
Localisé exactement les points de soudés	Eléments mobiles d'effort avec de l'inertie pour accompagner le bossage durant sa phase d'effondrement
Souder sans déformation	Outils importants
Elimine l'empreinte sur l'une des tôles	Electrodes précises massives ou en plusieurs parties
Faible usure des électrodes	Assemblage par recouvrement uniquement
De pouvoir rapporter des pièces mécaniques sur la tôle	Préparation des bossages artificiels
Possibilité de souder des pièces massives	Équilibrage de la densité de courant dans les bossages

1.14.8.1 Principe

Dans ce cas, les électrodes n'assurent plus la fonction d'effort et de courant, c'est une déformation locale de la tôle au niveau d'une protubérance, appelée **bossage** qui remplit ce rôle. Le bossage peut être semi-hémisphérique (+ courant), oblong ou annulaire.

1.14.8.2 Définition

Le procédé de soudage est comparable au procédé de soudage par résistance par points. Les pièces à souder sont superposées (assemblage par recouvrement) et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. Le bossage, obtenu par emboutissage de la pièce, assure la concentration du courant de soudage et la localisation de la soudure. L'ensemble pièces/électrodes est traversé par courant de soudage provoquant une élévation de T° par effet Joule à l'interface des deux pièces et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement du bossage ou des bossages. Lorsque la matière atteint un certain degré, le bossage s'affaisse et l'assemblage des deux pièces est réalisé.



1.14.8.3 Profil type du bossage artificiel et naturel

Il y aura un **échauffement** excessif de la protubérance si la côte e1 est trop forte, car la résistance électrique du bossage sera trop importante.

Il y aura **collage** si la côte e1 est trop faible, car l'énergie produite sera insuffisante.

Il y aura un effondrement trop rapide du bossage si la côte b est trop faible.

Bossages naturels : les pièces assurent la fonction de bossage suivant leur forme géométrique.

Bossages artificiels : le bossage est réalisé mécaniquement par déformation plastique ou par usinage.

Dimension de BOSSAGES				
Epaisseur		Diamètre d1	e1	Diamètre d2
Tôle mm	1	3.2	0.8	1
Tôle mm	2	4	1	1,25
Tôle mm	3	5	1.25	1.6

La forme et la dimension du bossage dépendent : de l'épaisseur et de la nuance des pièces, de l'intensité du courant, du temps de passage du courant, de la section de contact des électrodes et de l'effort appliqué aux électrodes.

1.14.8.4 Installation pour soudage par résistance de bossage

- Un transformateur de courant de soudage.
- Un dispositif de mise en pression des électrodes.
- Un dispositif de commande du cycle de soudage.
- Un circuit de refroidissement avec contrôle en température.

1.14.8.5 4.1 Types de transformateur

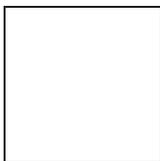
- Les transformateurs monophasés
- Les transformateurs triphasés avec changement de fréquence
- Les transformateurs triphasés avec redresseurs
- Les transformateurs électrostatiques (décharge de condensateurs)

1.14.8.6 4.2 Types de mise en pression des bossages

- La commande manuelle
- La commande pneumatique
- La commande hydraulique (eau ou huile)
- La commande mécanique

1.14.8.7 Cycle de soudage par résistance de bossages

Cycle simple de soudage le plus fréquemment utilisé :



1.14.8.8 Essais pour qualifier et contrôler le soudage par résistance en général

Pour vérifier la qualité du soudage d'un point de soudure par résistance, plusieurs essais destructifs sont réalisés :

- L'examen macrographique et/ou l'examen micrographique
- La filiation de dureté sous cordon des aciers susceptibles à la trempe
- L'essai de traction et de cisaillement
- L'essai d'arrachement ou de déboutonnage
- L'essai d'endurance ou de fatigue

Il est possible également de réaliser des contrôles en ligne sur la machine de soudage :

- En mesurant au cours de la séquence de soudage, l'évolution de la valeur de la résistance électrique et de la tension. En effet, cette résistance décrit une courbe caractéristique du bon déroulement du point de soudure.
- En mesurant la valeur d'écrasement des points de soudure et en déterminant une mesure limite haute et basse pour chaque point.
- En mesurant la température du point de soudure au cours de la séquence de soudage.

1.14.9 soudage en bout par ETINCELAGE

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Excellente qualité des joints soudés	Section admissible des pièces en fonction de la capacité de la machine
Rapidité d'exécution	
Possibilité de souder des formes très variées	Demande une grande puissance électrique
Limitation des déformations	Perte de matière lors du soudage par étincelage
Absence de préparation des bords à souder	Bouffant externe à éliminer par usinage
Possibilité d'automatisation	

Zone thermiquement affectée très faible	
Pas de protection du bain de fusion	

1.14.9.1 GENERALITE

1.14.9.1.1 Désignation normalisée

Française : Soudage par Etincelage (24).

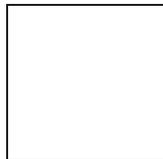
Américaine : Flash welding

Désignation internationale: **241** : Soudage par étincelage avec préchauffage

242 : Soudage par étincelage sans préchauffage

1.14.9.1.2 Principe

Le processus de soudage est réalisé sur une machine automatique. Les pièces à souder sont maintenues solidement par des mâchoires ou mors. Une des mâchoires est fixe et l'autre mâchoire est mobile en translation. Les pièces sont appliquées l'une contre l'autre avec un effort de pression modéré. L'ensemble est traversé par un courant de soudage qui provoque une suite de micro arcs électriques entre les aspérités du métal. C'est ce qui provoque l'échauffement (et non pas l'effet joule) et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de contact des aspérités des pièces. Un mouvement de déplacement lent à vitesse constante est appliqué à la mâchoire mobile. Des effets magnétiques violents chassent le métal en fusion et génèrent des étincelles. Lorsque toute la section des pièces est en fusion, un déplacement rapide et une forte pression sont appliqués pour assurer le forgeage avec chasse des impuretés et création d'un bourrelet externe sur les pièces.



1.14.9.1.3 Installation

Un transformateur de courant de soudage

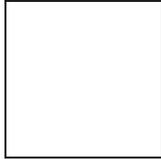
Un dispositif de serrage des pièces par vérins pneumatiques ou hydrauliques

Un dispositif de déplacement du mors mobile

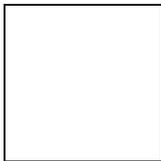
Un dispositif de commande du cycle de soudage

1.14.9.1.4 Réglage Cycle de soudage

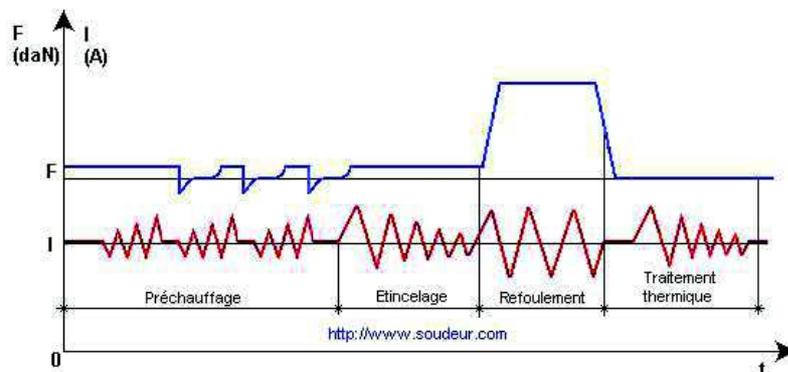
Cycle de soudage avec étincelage direct



Cycle de soudage avec préchauffage avant étincelage



Cycle de soudage avec préchauffage et Traitement Thermique



1.14.9.2 Paramètre de soudage du procédé par étincelage en bout

1.14.9.2.1 Intensité de soudage :

L'intensité est déterminée lors de la phase d'étincelage par les valeurs indicatives suivantes : de 5 à 30 A/mm².

L'intensité est déterminée lors de la phase de refoulement par les valeurs indicatives suivantes : de 30 à 40 A/mm².

1.14.9.2.2 Tension de soudage :

Il faut adopter une tension minimale compatible avec un étincelage optimal. La formule de calcul estimatif est égale à $0,5 V \times \varnothing_{\text{barre}}$.

1.14.10 soudage en bout par RESISTANCE PURE

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Rapidité de soudage	Les pièces à assembler doivent être dressées pour avoir une bonne portée des surfaces à souder
Pas de projections	La section doit être limitée pour appel du courant
	Le bourrelet est important (donc consommation importante du métal à prendre en compte pour la longueur initiale des pièces)

1.14.10.1 GENERALITE

1.14.10.1.1 Désignation normalisée

- Française : **Soudage en bout par résistance pure.**
- Américaine : **Résistance butt welding**
- Numérique internationale : **25**

1.14.10.1.2 Principe

Le principe du soudage en bout par résistance allie le principe du soudage par pression avec l'effet de transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique. Ce principe est connu sous le nom d'effet joule. Il ressemble beaucoup au soudage par point.

Les pièces sont serrées dans des mâchoires en alliage de cuivre, reliées au secondaire du transformateur. L'une des mâchoires est fixe, l'autre, mobile assure la mise en effort de l'assemblage.

Le courant étant établi par effet joule, le métal situé entre les mâchoires s'échauffe avec une élévation de température plus importante, à l'interface des pièces, ce qui est la manifestation d'une résistance de contact élevée.

Les systèmes d'avance du mors mobile sont commandés par des vérins pneumatiques ou hydrauliques ou des cames entraînées par moteur.

1.14.10.2 Cycle de soudage

Les pièces sont usinées afin d'obtenir le meilleur contact possible au niveau du joint.

- **Accostage** : les pièces sont mises en contact.

- **Echauffement** : il se produit par effet joule. Le courant est interrompu avant que la zone de liaison ne soit en fusion. Le métal est suffisamment ramolli pour être forgé.
- **Forgeage** : on repousse la partie chauffée par un violent effort de forgeage

1.14.10.2.1 Applications dérivées

D'autres procédés dérivés du soudage par résistance existent :

- Soudage par décharge de condensateurs : on charge une batterie de condensateurs et on les décharge dans le primaire d'un transformateur. Donc on a une puissance plus faible sur un temps plus long pour charger les condensateurs (pas de surcharge du réseau). C'est un procédé très répétitif.
- Soudage en courant triphasé redressé : cela évite le déséquilibre du réseau triphasé comme dans le soudage par point (machine monophasée).
- Brasage par résistance : on se sert de la machine pour chauffer la pièce. Les flux sont solides du fait de la force de serrage. Il est difficile de maîtriser les jeux ce qui est important pour la capillarité. Soudage par bossage

1.14.11 soudage par décharges de condensateur

1.14.12 soudage en triphasé redressé

utilisation d'un transformateur pour équilibrer le réseau

1.15 Autre procédés de soudage