

Soudage à l'arc

par **Roland CAZES**

*Ingénieur de l'École Supérieure d'Electricité
ex-Directeur des Recherches, Société Sciaky*

1. Propriétés de l'arc de soudage	B 7 730 - 2
1.1 Propriétés électriques.....	— 2
1.2 Propriétés thermiques.....	— 4
1.3 Formation de la soudure.....	— 4
1.4 Principaux procédés de soudage à l'arc.....	— 6
2. Soudage à l'électrode enrobée	— 7
2.1 Description du procédé.....	— 7
2.2 Caractéristiques de l'électrode.....	— 8
2.3 Domaines d'applications.....	— 10
3. Soudage sous flux en poudre	— 10
3.1 Description du procédé.....	— 10
3.2 Caractéristiques du couple fil/flux.....	— 11
3.3 Domaines d'applications.....	— 13
4. Soudage semi-automatique MIG et MAG.....	— 14
4.1 Description du procédé.....	— 14
4.2 Caractéristiques du couple fil/protection gazeuse	— 14
4.3 Domaines d'applications.....	— 16
5. Soudage à l'électrode réfractaire (TIG)	— 16
5.1 Description du procédé.....	— 16
5.2 Caractéristiques du couple électrode/protection gazeuse.....	— 17
5.3 Domaines d'applications.....	— 19
6. Procédés dérivés	— 20
6.1 Soudage au plasma.....	— 20
6.2 Soudage avec fil fourré.....	— 21
6.3 Soudage des fortes épaisseurs	— 21
6.4 Soudage à l'arc tournant.....	— 25
6.5 Soudage des goujons (procédé Nelson)	— 25
7. Mise en œuvre du soudage à l'arc	— 26
7.1 Équipement de base.....	— 26
7.2 Préparation des pièces	— 26
7.3 Différents modes d'utilisation	— 27

Bernandos (1887) puis Kjellberg (1914) ont été les tout premiers à utiliser le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. L'énergie est fournie par un banc d'accumulateurs et le soudage s'exécute au moyen d'une électrode qui va fondre au fur et à mesure, puis va se solidifier en un dépôt qui s'associe intimement au métal des pièces en formant une liaison continue. Le procédé se développe essentiellement grâce à la mise au point d'une électrode enrobée en cellulose qui, du fait de sa vaporisation formant écran de protection, réalise l'impérative condition, pour obtenir des soudures saines, de soustraire les métaux en fusion à l'action de l'air. Les principes fondamentaux de tous les procédés de soudage à l'arc par électrode fusible sont dès lors posés, de même que dans une certaine mesure le principe des procédés à électrode réfractaire.

On réalise ainsi que les phénomènes qui se déroulent dans un bain de soudure par fusion à l'arc relèvent de la **fonderie**, par opposition à ceux relevant de la **forge**.

L'avènement des différents procédés fondés sur l'arc se déroule ensuite pas à pas de façon logique :

- l'enrobage devient minéral et mieux contrôlable ;
- l'âme métallique de l'électrode en tronçons limités devient un fil continu avec un enrobage amené directement sous forme de poudre ;
- l'enrobage est remplacé par un apport gazeux plus facile d'emploi ;
- l'électrode peut également être réfractaire.

Ces modifications débouchent sur les quatre procédés fondamentaux qui forment aujourd'hui la panoplie de base du soudage à l'arc.

Seront exposées dans le présent article les lois électriques et thermiques de l'arc, communes à ces quatre procédés, puis développés pour chacun d'eux et quelques-unes de leurs variantes, les principes et les caractéristiques les plus importantes. La compréhension de ces bases rendra évidentes les particularités présidant à leurs applications spécifiques et à leur mise en œuvre. L'exposé suit l'ordre historique, au demeurant logique du point de vue théorique et pratique, d'apparition des procédés ; on pourra alors comprendre sans difficulté d'autres classifications. Les différentes façons de mettre en pratique les procédés examinés relevant de principes communs ou voisins sont évoqués dans un paragraphe en l'article.

Le lecteur pourra également se reporter à l'article [B 7 700] pour les différents procédés de soudage.

1. Propriétés de l'arc de soudage

Un arc est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur et dégageant lumière et chaleur ; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques essentiellement :

- *électriques*, reliant tension et courant, auxquelles se rattachent les caractéristiques et le fonctionnement des générateurs ;
- *thermiques* auxquelles se rattachent les phénomènes de fusion.

L'arc électrique est la source de chaleur à la base d'un certain nombre de procédés de soudage s'appuyant sur :

- ses effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est un arc court entre une électrode, formant l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion ;
- les phénomènes de transfert de métal qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, à la pièce, formant un dépôt continu se *diluant* avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique recherchée. Dans les procédés où l'électrode est réfractaire, il n'y a évidemment pas de transfert de métal électrode-pièce.

1.1 Propriétés électriques

Lorsqu'un arc est amorcé et entretenu entre deux électrodes placées en regard, ou plus précisément entre une électrode et une pièce métallique reliées aux bornes d'un générateur approprié, on constate que le circuit est traversé par un courant *I* et qu'il apparaît aux bornes une tension *U*.

Nota : dans la normalisation en général, on affecte de l'indice 2 toutes les grandeurs relatives au circuit de soudage qui est toujours le secondaire d'un générateur et de l'indice 1 toutes les grandeurs relatives au primaire dudit générateur et se rapportant surtout aux questions de branchement. Dans la suite de l'exposé, les grandeurs seront donc exprimées conformément aux recommandations et affectées de l'indice 2. Ainsi, le courant et la tension d'un arc de soudage seront respectivement *I*₂ et *U*₂.

*U*₂ et *I*₂ ne sont pas indépendants et il existe entre eux une relation *U*₂ = *f* (*I*₂, *ℓ*, ...) représentée par un réseau de courbes appelé **caractéristiques d'arc** (figure 1). Cette relation n'est pas simple car de nombreuses variables y figurent parmi lesquelles, pour s'en tenir aux plus significatives : la nature de l'atmosphère gazeuse siège de l'ionisation, la nature, la forme et la distance des électrodes, le pouvoir émissif de la cathode, etc. Compte tenu de la diversité des situations rencontrées dans la pratique, il n'est possible de tracer ces courbes représentatives que dans des cas particuliers où les conditions sont connues.

Dans les normes (AFNOR A 85-000 et suivantes), ces courbes sont remplacées par des **caractéristiques dites conventionnelles** de la forme :

$$U_2 = A + B I_2$$

A et *B* étant des paramètres propres à chaque procédé :

Électrode enrobée	$U_2 = 20 + 0,04 I_2$	jusqu'à 44 V
Sous flux	$U_2 = 20 + 0,04 I_2$	jusqu'à 44 V en caractéristique tombante
	$U_2 = 14 + 0,05 I_2$	jusqu'à 44 V en caractéristique plate
MIG/MAG	$U_2 = 14 + 0,05 I_2$	jusqu'à 44 V
TIG	$U_2 = 10 + 0,04 I_2$	jusqu'à 24 V

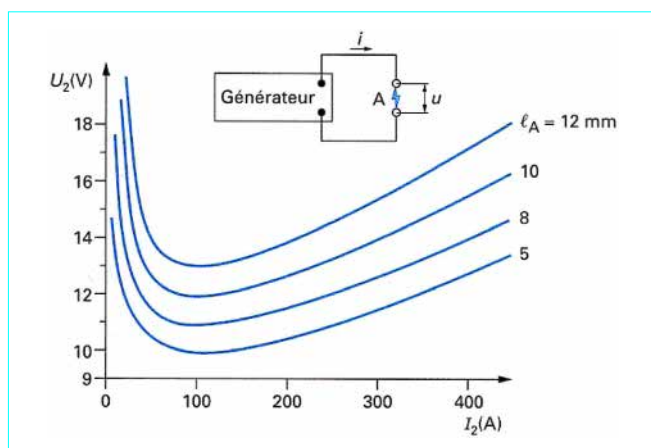


Figure 1 – Caractéristiques d'arc $U_2 = f(I_2)$ pour différentes longueurs d'arc ℓ_A

Elles permettent d'uniformiser l'étalonnage des générateurs.

Une caractéristique d'arc coupe une caractéristique secondaire $U_2 = f(I_2)$ du générateur en un point Q qui est le point de fonctionnement (figure 2) donnant le courant et la tension d'arc correspondant à un réglage de soudage et à une longueur d'arc donnés.

■ Courant

Pour une longueur d'arc ℓ donnée, on augmente le courant en agissant sur la force électromotrice du générateur. Dans le même temps, la tension aux bornes de l'arc s'accroît ainsi que la puissance totale UI engendrée. Les lois physiques sont telles que la température et le volume ionisé augmentent dans le même temps (figure 3). C'est donc en agissant sur le courant que l'on règle la puissance de l'arc en soudage.

■ Tension

Pour un gaz donné (tableau 1), la tension qui apparaît aux électrodes résulte de la distance qui les sépare et du courant qui le traverse. Elle traduit l'existence le long de la colonne ionisée des trois chutes de potentiel suivantes (figure 4) : chute anodique, chute cathodique et chute dans la colonne.

Les deux premières sont liées aux phénomènes électroniques prenant place à la surface des électrodes. Elles occupent une épaisseur négligeable, mais l'existence de l'arc en dépend, car elles déterminent une valeur de sa tension au-dessous de laquelle il n'y a pas de fonctionnement possible. La troisième s'étend donc pratiquement d'une électrode à l'autre et donne lieu à un gradient électrique uniforme. Lorsque la longueur d'arc augmente, la tension augmente également de façon proportionnelle. La mesure de la tension donne par suite une information sur sa longueur.

■ Polarité

Un arc électrique peut fonctionner en courant continu ou alternatif. On aura ainsi l'une des trois situations suivantes :

- *courant continu, électrode reliée au pôle négatif* du générateur et formant cathode. On dit alors que la polarité est DIRECTE ;
- *courant continu, électrode reliée au pôle positif* du générateur et formant anode. On dit alors que la polarité est INVERSE ;
- *courant alternatif* à la fréquence du réseau ou à une fréquence différente, où électrode et pièces sont alternativement anode et cathode. On dit alors que la polarité est VARIABLE.

Ces trois dispositions sont physiquement différentes, elles ont chacune leur champ d'application.

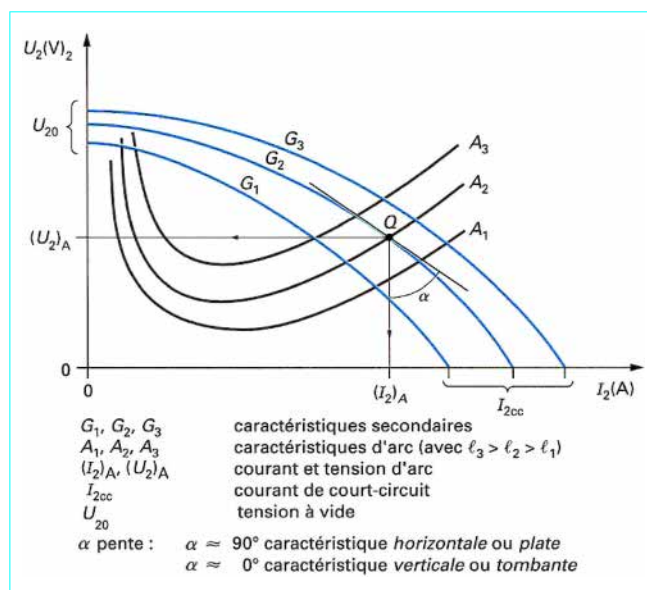


Figure 2 – Fonctionnement d'un générateur

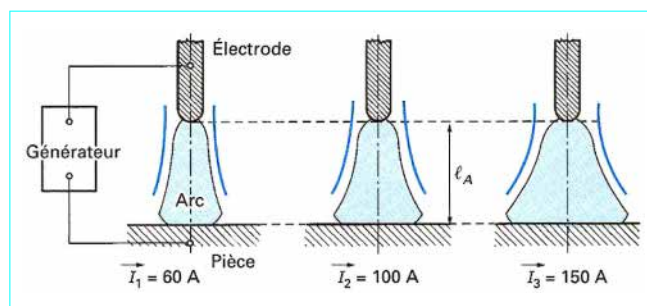


Figure 3 – Effet du courant sur l'arc

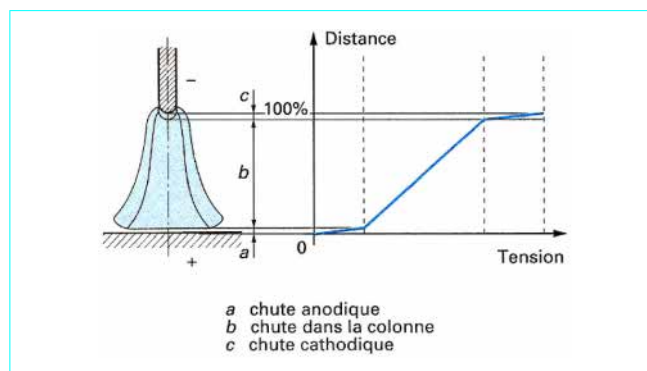


Figure 4 – Répartition du potentiel le long de l'axe : principe

■ Puissance

Le produit ui (valeurs instantanées) donne à chaque instant la puissance p instantanée dissipée dans l'arc. Il est important de rappeler qu'un arc électrique ne répond pas à la loi de Joule (de forme RI^2).

On retiendra simplement les quelques règles suivantes :

- pour une distance fixe entre électrodes, la tension d'arc est une fonction croissante du courant ;
- pour un courant donné, la tension est une fonction croissante de la distance entre électrodes ;
- la puissance dissipée passe par un maximum en fonction de la distance ;
- toutes choses égales par ailleurs, la tension d'arc est en relation avec le ou les potentiels d'ionisation du ou des gaz où l'arc est établi. Ainsi, pour un même courant, à un gaz au potentiel d'ionisation élevé correspond une tension d'arc élevée et par suite une puissance élevée.

1.2 Propriétés thermiques

■ Répartition de la chaleur

La puissance p dissipée dans l'arc se transforme en quantité de chaleur Q_T par unité de temps qui se répartit en trois ($Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$) :

- Q_1 et Q_2 absorbées respectivement par l'électrode et par les pièces et servant seules au soudage,
- Q_3 rayonnée et perdue dans l'espace environnant.

Le rendement η est égal à $(Q_1 + Q_2)/Q_T$.

Le répartition de l'énergie Q_T selon Q_1 , Q_2 et Q_3 dépend, ainsi que l'indique de façon schématique la figure 5, de la longueur d'arc et du courant. Pour un même courant, lorsque l'on écarte les électrodes, la puissance de l'arc et par suite Q_T croît. Mais Q_3 croît plus rapidement et le rendement η de l'arc diminue.

Ces considérations appellent trois remarques :

- un courant et une longueur d'arc constants donnent lieu, toutes choses égales par ailleurs, à un effet thermique et des conditions de soudage constants ;
- dans un arc à électrode fusible, la variation du rendement avec la longueur d'arc se traduit par un effet autorégulateur particulièrement important pour la stabilité des phénomènes de fusion ;
- lorsque l'on utilise le soudage sous sa forme manuelle, l'action volontaire d'approche ou de recul de l'électrode (tenue à la main par le porte-électrode) constitue un moyen naturel d'ajuster instantanément la puissance de l'arc.

Tableau 1 – Potentiels d'ionisation (en volts) de vapeurs métalliques et de gaz

Vapeurs métalliques			
Al	5,986	K	4,341
B	8,298	Li	5,392
Ba	5,212	Mg	7,646
C	11,260	Mo	7,099
Ca	6,113	Na	5,139
Co	7,86	Ni	7,635
Cr	6,766	Si	8,151
Cs	3,894	Ti	6,82
Cu	7,726	W	7,98
Fe	7,870		
Gaz			
Ar	15,760	CO ₂	13,77
He	24,587	H ₂	13,598
O ₂	12,07	N ₂	15,58

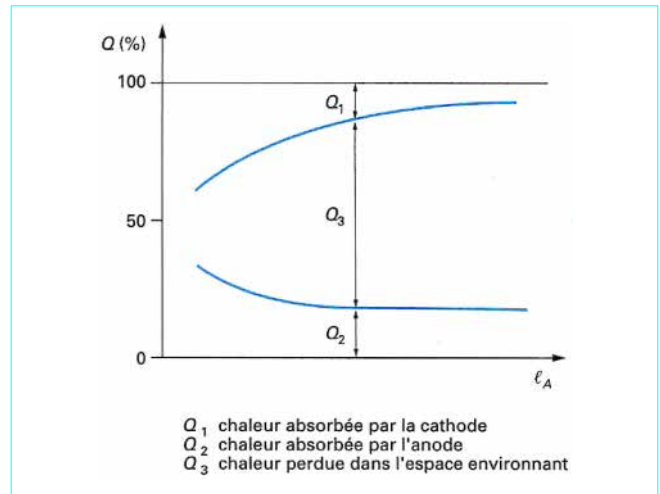


Figure 5 – Allure de la répartition de la chaleur dans l'arc, pour un courant donné en fonction de la longueur d'arc

■ Transfert de métal

Lorsque l'électrode est fusible et quelle que soit sa polarité, s'installe dans l'arc le phénomène naturel de transfert de métal par lequel l'extrémité de l'électrode en fusion se projette à grande vitesse (10^5 mm/s) sur le joint à souder. C'est un phénomène fondamental auquel les procédés de soudage à l'arc doivent leur existence. Il provient :

- des effets de pincement électrodynamique du courant, lequel agit par son carré (indépendance de la polarité), sur le métal liquide de l'extrémité de l'électrode en y formant des gouttes ou en le vaporisant car la densité de courant s'élève considérablement ;
- des effets de répulsion qui s'ensuivent (indépendance de la gravité).

On distingue dans la pratique trois modes de transfert de métal qui apparaissent en fonction de la densité du courant et de la viscosité du métal de l'électrode (figure 6) :

- le *transfert par gouttes isolées ou globulaire (drop)*, transfert discontinu ;
- le *transfert par fines gouttelettes (transition)*, transfert continu ;
- le *transfert par pulvérisation (spray)*, transfert continu.

1.3 Formation de la soudure

L'arc est donc la source de chaleur extérieure produisant, localement sur la pièce et indépendamment du transfert de métal, un flux de chaleur d'allure globalement gaussienne et de valeur suffisante pour obtenir un gradient conduisant à la fusion et à la formation du *cordon de soudure*.

Le flux thermique moyen d'un arc de soudage est de l'ordre de 5 à 100 W/cm². Le gradient de température qui en résulte ne produit **pas de pénétration importante** ; celle-ci est en effet du même ordre que la largeur de la zone fondue qui apparaît au départ sous la forme d'un *bain de soudure (welding pool)* se creusant par suite d'effets divers (capillarité, soufflé gazeux).

La figure 7 donne une idée de l'allure des isothermes formées par l'arc à l'arrêt et en déplacement. Comme dans tous les procédés de soudage par fusion, chaque point du cordon a connu une séquence échauffement/fusion/refroidissement à laquelle se rapporte la métallurgie locale de la soudure et les caractéristiques mécaniques finalement obtenues. L'apport de métal, par fusion naturelle de

l'électrode ou effectué séparément, a pour effet de combler la dépression du bain et de former un cordon bombé de morphologie particulièrement favorable (figure 8).

Lorsque les épaisseurs à souder sont supérieures à la pénétration naturelle, la soudure à l'arc est alors appropriée au soudage par remplissage, au moyen de passes multiples superposées ou par un balayage transversal, d'un chanfrein pratiqué sur les bords à souder ou formé naturellement lors d'un soudage d'angle (soudure en L ou en T). La notion de pénétration disparaît lors du soudage par passes multiples car on peut ainsi réaliser, malgré le faible pouvoir pénétrant des arcs de soudage, des soudures liant les pièces sur la totalité de leur épaisseur.

La liaison métallique est obtenue par l'intermédiaire du métal provenant de l'électrode, ou métal déposé, et par l'intermédiaire également des deux zones attenantes, plus ou moins importantes, dans lesquelles le métal de l'électrode s'est dilué dans le métal de base.

La figure 9 illustre les différents types de soudures formés par soudage à l'arc.

La technologie et l'économie des applications de soudage à l'arc font intervenir la disposition, la forme et les dimensions du (ou des) chanfrein(s) en fonction de la liaison à réaliser et des épais-

seurs en cause (figure 10). Une normalisation existe pour la préparation des joints, sur acier (NF EN 29-692) et sur aluminium (NF A 89-310).

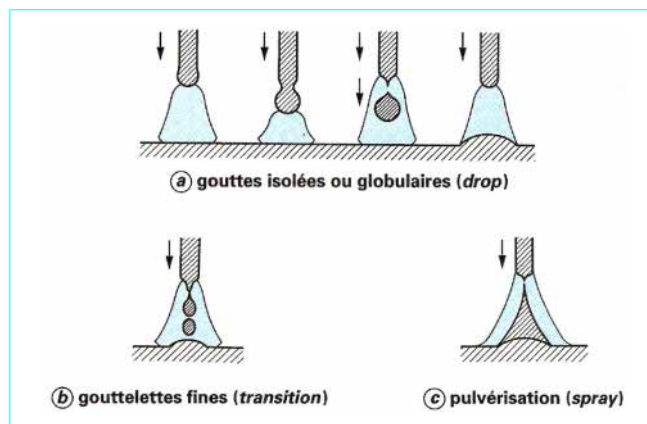


Figure 6 - Différents types de transfert de métal

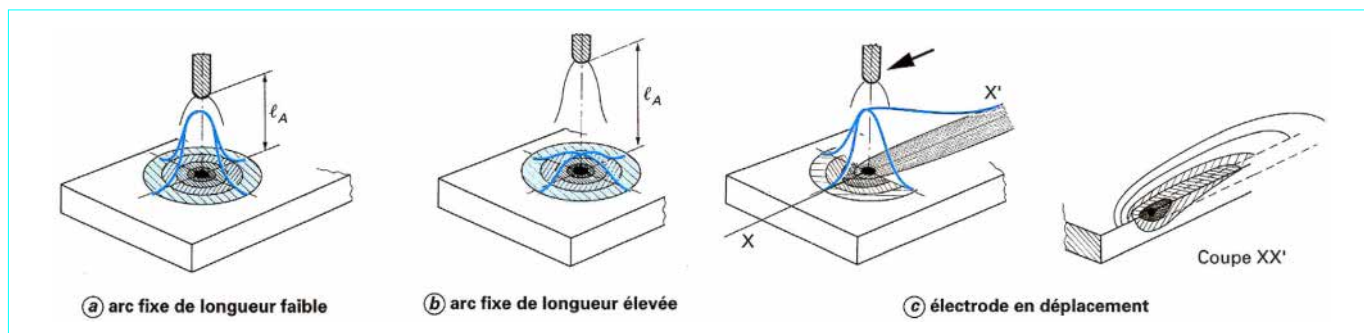


Figure 7 - Répartition de l'énergie sur la pièce

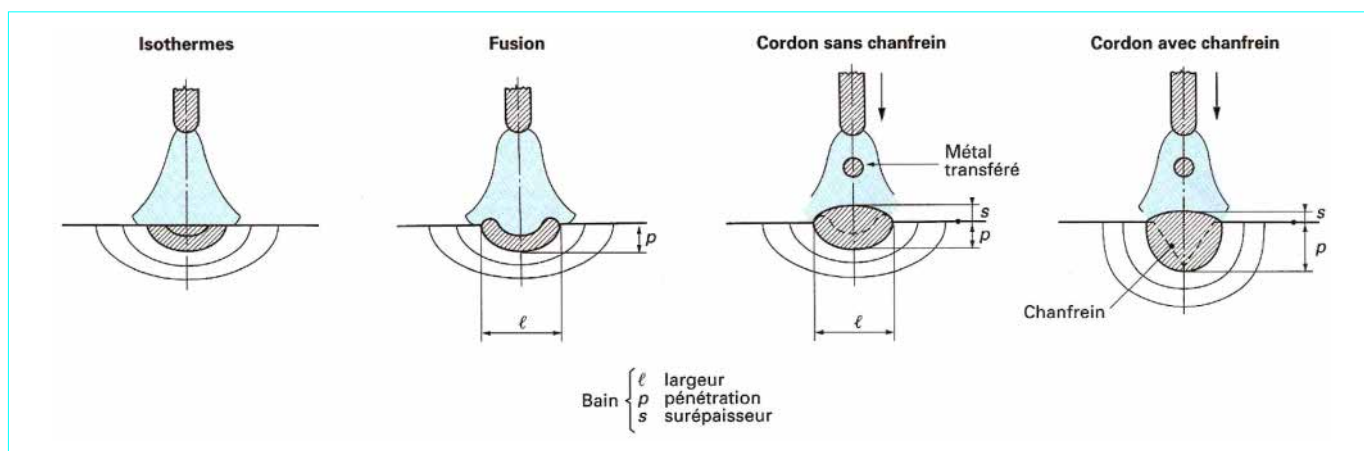


Figure 8 - Formation de la soudure : isothermes, fusion, cordon avec ou sans chanfrein

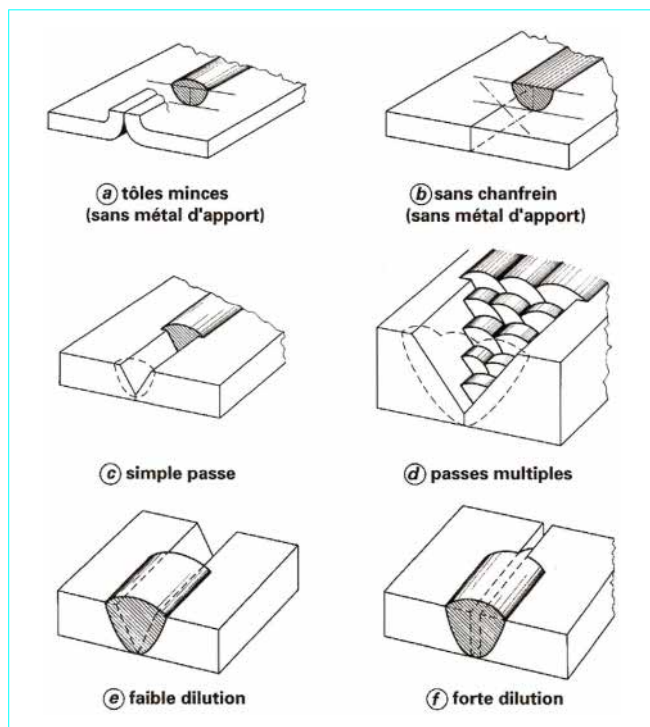


Figure 9 – Soudage bout à bout

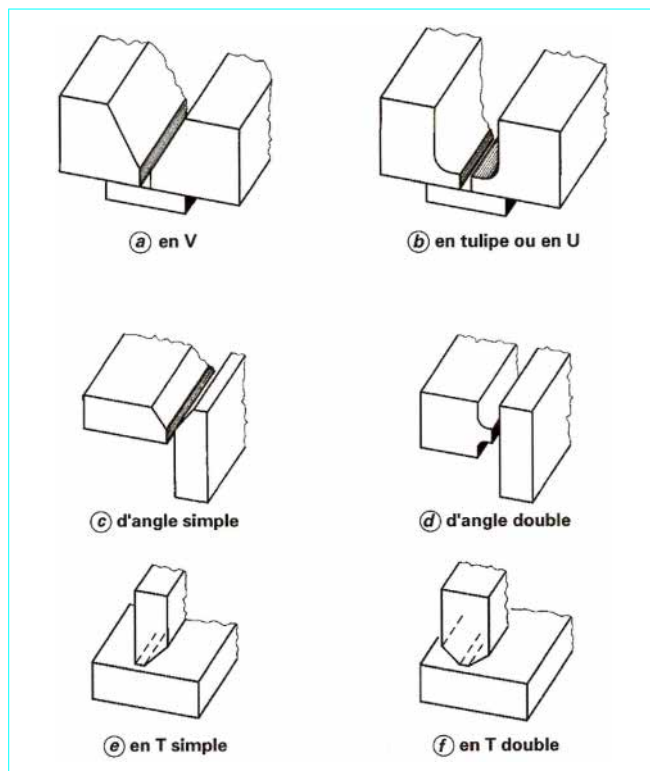


Figure 10 – Principe de la technique du chanfrein

1.4 Principaux procédés de soudage à l'arc

Différents procédés de soudage sont fondés sur les phénomènes précédents (NF EN 287, NF L 06-384). Il se caractérisent chacun par deux éléments essentiels :

- la **nature de l'électrode** : baguette, fil fusible ou tige réfractaire ;
- la **nature du milieu**, gaz ou vapeurs, dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrices vis-à-vis de l'atmosphère ambiante.

On distingue ainsi (figure 11) :

- le **soudage à l'électrode enrobée** (ou baguette), se conduisant à la main et appelé également **soudage manuel** ;
- le **soudage sous flux en poudre**, utilisant comme électrode un fil métallique fusible se déroulant de façon continue. Le flux assure la protection du bain ;
- les **soudages semi-automatique et automatique** sous gaz. L'électrode est également un fil fusible, et la protection est réalisée par un gaz inerte (soudage MIG) ou actif (soudage MAG) ;
- le **soudage à électrode de tungstène** non fusible (TIG). La protection est réalisée par un gaz nécessairement inerte. L'apport de métal, facultatif, s'effectue indépendamment.

Chacun d'eux fera l'objet d'un paragraphe particulier. Il existe en outre des **procédés dérivés** des précédents dont les plus importants sont : le soudage au plasma, le soudage au fil fourré, le soudage des fortes épaisseurs, le soudage à l'arc tournant et le soudage des goujons, qui feront l'objet d'un paragraphe séparé.

Le tableau 2 synthétise les principales caractéristiques des différents procédés permettant de faire un choix rapide et grossier entre les quatre grands procédés de soudage à l'arc.

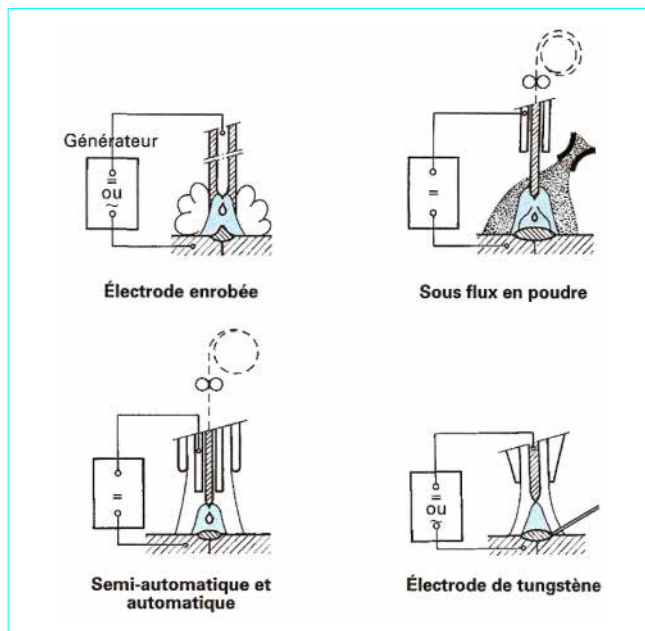


Figure 11 – Différents procédés de soudage à l'arc : schémas de principe

Tableau 2 – Comparaison des principales caractéristiques des quatre procédés de soudage à l'arc

Caractéristique	Procédé			
	Électrode enrobée	Flux en poudre	MIG/MAG	TIG/plasma
Matériaux préférentiels	tous les aciers (1), aciers et alliages	tous les aciers (1), aciers et alliages	tous les aciers (1), aciers inoxydables	tous les aciers (1), aciers inoxydables, titane, nickel, etc.
Epaisseurs (mm)	5 à 20 plutôt moyennes	10 à 100 (et +) plutôt fortes	1 à 15 plutôt faibles à moyennes	0,5 à 10 plutôt très faibles à faibles
Utilisation	manuelle exclusivement	mécanisée presque exclusivement	toutes : manuelle, mécanisée ou automatique	toutes : manuelle, mécanisée ou automatique
Matériel et équipement	simple et robuste	assez lourd (à cause du flux de poudre) et robuste	simple (mais bouteilles de gaz) et robuste	compliqué et plutôt délicat (électrode)
Courant (A)	50 à 250	100 à 600 et plus	50 à 300	2 à 400
Critère de choix principal	électrode	couple fil/flux	couple fil/gaz (alimentation)	gaz
Sujétion d'emploi	longueur de l'électrode	tube-contact	tube-contact	électrode et propreté
Protection contre les rayonnements	forte	sans	forte	forte
Vitesse opératoire	lente (en fonction du taux de métal déposé)	forte (en fonction du taux de métal déposé)	moyenne (≈ 1 m/min)	faible (≈ 0,2 m/min)
Productivité	faible	forte	moyenne	faible
Forme de joint	en bout, à clin, en T	en bout, en T	en bout, à clin, en T	en bout, à clin
Position du cordon de soudage	toutes	horizontale	toutes	horizontale, verticale descendante
Hygiène	aspiration des fumées, rayonnements	aspiration des poussières	aspiration des fumées, rayonnements	rayonnements, fumées (faibles)
Applications	tous travaux	chaudronnerie lourde	constructions soudées légères	constructions aéronautiques

(1) tous aciers : faiblement et fortement alliés, spéciaux, etc.

2. Soudage à l'électrode enrobée

Caractères principaux :

Électrode : tige métallique ou *baguette* de longueur limitée formant le métal d'apport.

Protection : vapeurs provenant d'un enrobage de l'électrode.

Nature du courant : alternatif ou continu.

2.1 Description du procédé

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), appelé **soudage manuel à l'arc** (*manual arc welding, shielded metal arc welding process*), s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la figure 12.

L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse.

L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact

électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode, la production de vapeurs et la formation du cordon qui, après refroidissement, se présente comme indiqué sur la figure 12, recouvert du laitier vitrifié dû à l'enrobage fondu et que l'on évacue ultérieurement.

La fusion de l'électrode et la formation progressive du cordon entraînent un réflexe d'approche de la main de l'opération conditionné par le maintien d'un arc stable.

Toutes les caractéristiques du procédé, à savoir son fonctionnement, sa mise en œuvre et les caractéristiques des soudures obtenues, reposent sur deux éléments fondamentaux :

- la *technologie des électrodes* ;
- l'*habileté de l'opérateur*.

L'électrode enrobée (au sens générique du terme) constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. Déterminée et construite en fonction du matériau à souder, elle **impose**, entre autres, **la nature et l'intensité du courant que devra délivrer le générateur et est à l'origine des taux de dépôt, de la qualité des soudures, etc.** Quant au soudeur, il contrôle la fusion du métal et la régularité du cordon, et doit avoir pour cela une formation professionnelle appropriée.

Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblages en **aciers au carbone**, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre.

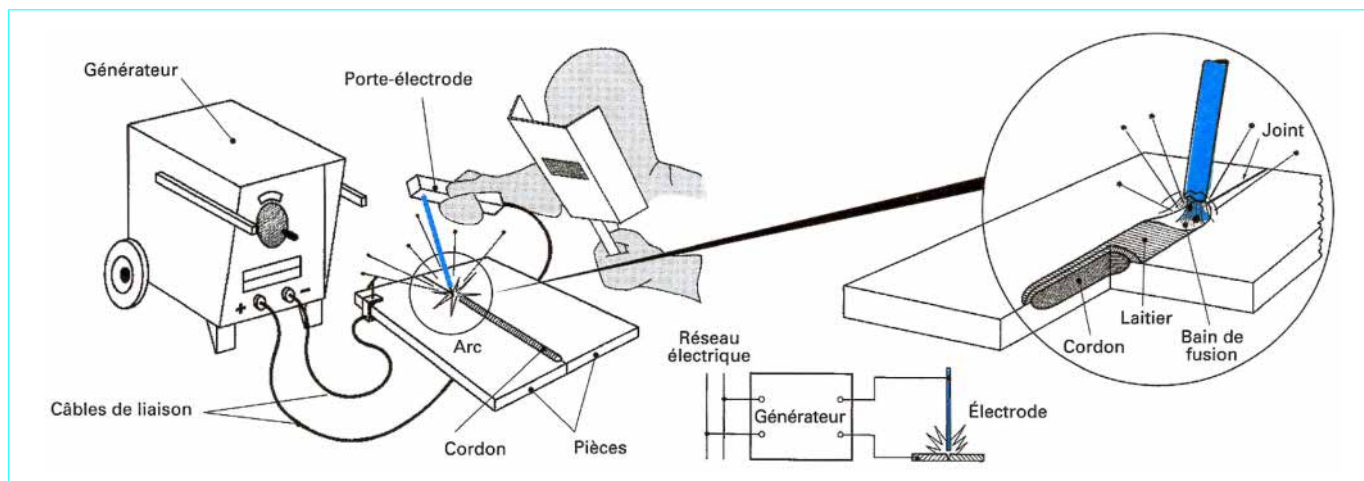


Figure 12 – Soudage à l'électrode enrobée : principe

2.2 Caractéristiques de l'électrode

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une **baguette** (d'où les expressions courantes de *baguette de soudage* et de *soudage à la baguette*) **comportant une âme métallique conductrice et un enrobage composite** généralement non conducteur (figure 13). L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures. C'est pourquoi il en existe un grand nombre de types différents finement répertoriés et normalisés (NF A 81-300).

Nous donnons ci-après quelques données générales concernant l'âme métallique et son enrobage.

2.2.1 Âme métallique

L'âme métallique conduit le courant, apporte le métal, forme le cordon et comporte des éléments d'alliages devant assurer une grande part des caractéristiques désirées de la soudure.

Le métal de l'âme est en général très proche du métal de base à souder. La section est choisie en fonction du taux de dépôt désiré, lui-même fonction des épaisseurs en présence et de l'assemblage à réaliser. Elle détermine par suite le courant de soudage à utiliser. La longueur n'excède pas 400 à 500 mm, pour des raisons évidentes de fabrication et d'emploi.

2.2.2 Enrobage

L'enrobage est constitué par un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant. Compte tenu des effets nombreux et variés que ces différents corps peuvent produire grâce à leurs comportements physico-chimiques pendant le soudage et dans les soudures elles-mêmes, il existe une grande diversité d'enrobages dont l'élaboration relève souvent de secrets de fabrication. Les éléments les plus employés sont des minerais, silicates, carbonates, matières organiques, métaux en poudre, graphite, etc.

Différentes épaisseurs d'enrobage existent dans les normes : minces, semi-épais et épais, respectivement < 140 %, 140 à 180 % et > 180 % du diamètre de l'âme.

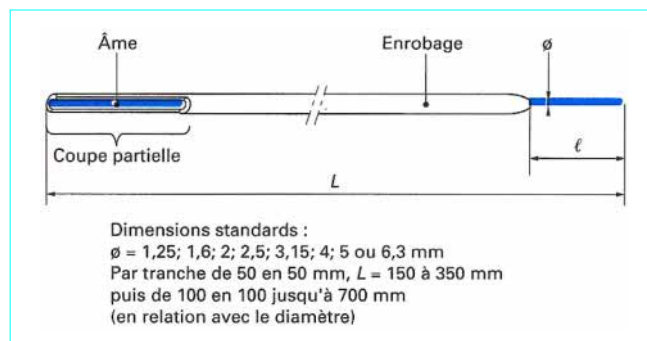


Figure 13 – Électrode enrobée : caractéristiques

■ Types d'enrobage

Selon les réactions intervenant dans le bain de soudure, on ramène les différents types d'enrobage à cinq grandes classes qui, du fait de certains composants, présentent chacune des caractéristiques majeures (NF A 81-300) et dont les plus importantes sont :

- **enrobage acide** (symbole *A* ou *RA*) : réservé à des aciers de bonne soudabilité ;
- **enrobage basique** (symbole *B* ou *RB*) : courant continu, laitier facile à détacher ;
- **enrobage cellulosique** (symbole *C* ou *RC*) : forte pénétration, arc relativement instable, soudage en position, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures ;
- **enrobage rutile** (symbole *R* et *RR*) (le rutile est l'oxyde de titane TiO_2) : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, pénétration moyenne, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures ;
- **enrobage oxydant** (symbole *O*) : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, faible pénétration, belle apparence du cordon, travaux courants.

Le symbole *S* est relatif aux enrobages spécifiques non répertoriés.

■ Rôles de l'enrobage

● Rôle électrique

C'est le premier rôle essentiel de l'enrobage ; il permet d'amorcer l'arc et de le maintenir de façon stable par les vapeurs et divers dégagements gazeux qui y prennent place. Le potentiel d'ionisation des éléments dégagés définit directement, pour un courant donné, la

tension d'arc. Selon la composition de l'enrobage, cette tension peut varier dans de larges limites comprises entre 4 et 30 V. Deux conséquences en résultent :

- la stabilité de l'arc et sa facilité d'amorçage et de réamorçage d'autant plus aisées que la tension d'arc est basse, grâce par exemple à des éléments tels que le potassium, le sodium aux potentiels d'ionisation très bas ;
- toutes choses égales par ailleurs, la puissance obtenue dans l'arc et par suite la fusion de l'électrode et la pénétration qui lui sont liées, d'autant meilleures que la tension est élevée.

En découleront les principales conditions d'utilisation :

- type de courant approprié (alternatif ou continu) ;
- tension d'amorçage (à vide) du générateur ;
- pénétration et taux de dépôt ;
- diversité d'emploi, etc.

● Rôle métallurgique

L'enrobage doit, pour exercer son second rôle essentiel de protection pendant le soudage, émettre des vapeurs chassant l'air de la zone d'arc et posséder des qualités neutres, légèrement réductrices ou au pouvoir oxydant contrôlé.

Pendant et après la fusion, l'enrobage forme laitier et surnage par sa faible densité au-dessus du bain jusqu'au refroidissement complet au cours duquel il se solidifie tout en conservant son action protectrice ; il doit être enlevé par piquage.

On a constaté que certains éléments de l'enrobage se diluaient dans le métal en fusion et se retrouvaient dans le cordon. De là, l'idée d'introduire par ce biais des corps tels que le manganèse, le silicium, le titane, le nickel, le chrome, etc. de nature à participer à la texture métallurgique résultante de la zone fondue.

● Rôle mécanique

Le laitier que forme l'enrobage a en outre un certain nombre d'autres effets purement mécaniques sur :

- le bombé du cordon ;
- la dilution et la pénétration par effet de creuset ;
- la possibilité de travailler en position par la viscosité et l'adhérence.

2.2.3 Fusion de l'électrode

Bien qu'elles dépendent d'un grand nombre de facteurs, les caractéristiques de fusion de l'électrode répondent à des lois générales rappelées ci-après.

■ Constante de fusion

La quantité de métal déposé par unité de temps dépend linéairement du courant d'arc (figure 14). Le coefficient de proportionnalité qu'il est possible de relever varie d'un modèle d'électrode à l'autre et peut être considéré comme une caractéristique propre à chacun d'eux. On appelle ce coefficient *constante de fusion*, il s'exprime en $\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{h})$. Sa connaissance permet d'établir le temps nécessaire pour réaliser un dépôt de poids donné, à une intensité fixée.

■ Pertes de fusion

Elles sont dues aux projections qui se produisent pendant le soudage et pour diverses raisons (type d'enrobage, caractéristiques du générateur, type de transfert, température relative du métal apporté par rapport aux pièces, conditions opératoires, etc.). Selon le cas, ces pertes peuvent atteindre des proportions importantes, de l'ordre de 20 à 25 %.

Signalons en outre que l'électrode n'est jamais complètement consommée, la longueur prise dans la pince étant inutilisable et représentant une perte supplémentaire de 5 % environ.

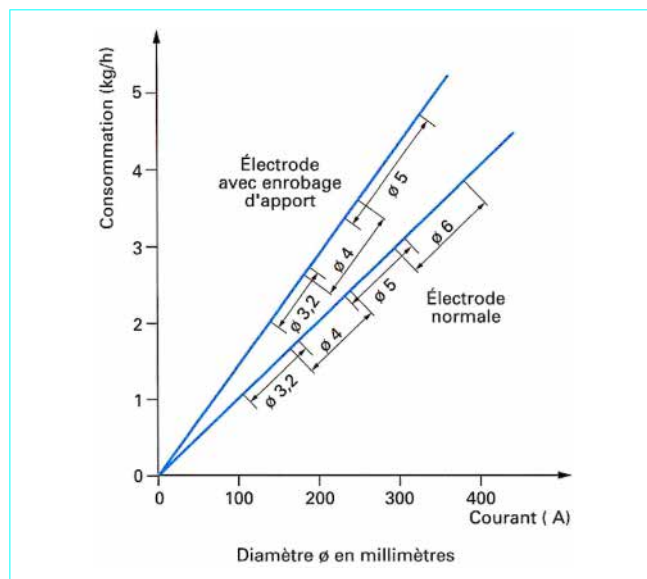


Figure 14 – Fusion des électrodes

■ Rendement

Il est défini comme le rapport entre le poids du métal déposé et celui de l'âme effectivement fondue. Sachant que l'on peut effectuer un apport de métal par l'enrobage (figure 14), ce rendement de l'électrode enrobée exprime donc en définitive la proportion de cet apport dans l'apport total. On produit ainsi des électrodes ayant des rendements pouvant atteindre 200 %.

■ Pénétration, vitesse de soudage, vitesse opératoire

La pénétration et la vitesse de soudage dépendent non seulement de la nature de l'électrode mais aussi de ses conditions d'utilisation : nature du travail, position de soudage, intensité, etc.

Du fait de l'apport de métal par longueurs discrètes, des arrêts séquentiels plus ou moins longs peuvent avoir une certaine importance dans l'exécution d'un assemblage complet. Par ailleurs, le changement de position ou de place de l'opérateur peut également diminuer la vitesse d'exécution d'un travail compliqué en comparaison avec une utilisation plus simple.

Le tableau suivant donne quelques consommations d'électrodes.

Fusion des électrodes ($\eta = 0,7$)		
Diamètre \varnothing (mm)	Nombre d'électrodes	
	par kg de métal déposé	par heure
3,2	49	20 à 25
4	32	14 à 18
5	21	12 à 14

Pour chaque modèle d'électrode, les constructeurs donnent le poids de métal déposé correspondant à l'intensité moyenne recommandée pour son emploi ainsi que, pour les sections de chanfreins les plus courantes, le nombre d'électrodes nécessaire par mètre de soudure.

■ Caractéristiques mécaniques et métallurgiques

Outre sa composition et sa destination, l'électrode est caractérisée également par les propriétés du métal déposé. Celles-ci sont déterminées sur des dépôts exécutés conformément à des normes AFNOR précises (cf. *Pour en savoir plus* en fin de cet article) ou suivant des spécifications édictées par des administrations ou organismes officiels (Marine, EDF, SNCF, Bureau Veritas, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping, etc.).

Les caractéristiques s'expriment essentiellement par :

- la charge à la rupture (en N/mm²) ;
- la limite d'élasticité (en N/mm²) ;
- la résilience (en J/cm²) ;
- l'énergie de tension en joules désignée par le symbole KV, ainsi que par l'allongement, la dureté moyenne, la caractéristique métallurgique concernant le dosage des différents composants du métal déposé.

2.3 Domaines d'applications

Hormis quelques tentatives de mécanisation ou d'automatisation, le soudage à l'électrode enrobée est un **procédé exclusivement manuel qui se rencontre en pratique dans tous les domaines industriels** dont il satisfait les besoins à quelques réserves près. Il revêt en effet une *simplicité* et une *flexibilité* inégalées grâce à :

- un *équipement on ne peut plus simple* ;
- une *électrode enrobée* qui, sous une forme pratique et d'acquisition facile, véhicule le métal d'apport et la protection, et rassemble les paramètres métallurgiques, unique adaptation de ce procédé à la nature des travaux et des matériaux mis en œuvre, principalement les métaux ferreux.

Ces avantages sont à opposer aux inconvénients :

- d'un *fonctionnement cadencé* ;
- d'une *capacité et d'une productivité limitées*.

C'est ainsi qu'il s'impose :

- dans les travaux de soudage surtout lorsqu'ils sont très diversifiés : chaudronnerie générale, serrurerie, mécanosoudure ;
- sur les chantiers : ponts, navires, pipelines, charpentes, etc., dans des travaux de nature hautement technique.

Mieux que le chalumeau ou tout autre procédé (il n'a pas le problème des bouteilles de gaz sous pression), il est le moyen typique des petits travaux d'entretien ou d'amateur pour lesquels se sont développés des générateurs, ou *postes*, légers à faible facteur d'utilisation (30 à 40 %). On trouve des électrodes *travaux courants* chez tous les quincailliers.

3. Soudage sous flux en poudre

Caractères principaux :

Électrode : fil métallique fusible dévidé d'une façon continue.

Protection : apport simultané de poudre composite appelé *flux*.

Courant : continu et alternatif.

3.1 Description du procédé

Le soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) constitue l'**automatisation du soudage à l'électrode enrobée**. Il associe en effet un **fil électrode fusible**, dévidé d'une bobine, avec une protection

obtenue par des vapeurs provenant d'une **poudre composite** comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, mais indépendamment de l'électrode. Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues multihoraires. Ce procédé est aussi appelé **soudage à l'arc submergé** (*submerged arc welding process* ou SAW).

Le soudage sous flux se conduit d'une manière presque exclusivement automatique avec des installations dont le principe est représenté sur la figure 15 et qui comportent essentiellement :

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

Comme dans toute automatisation, la tête de soudage sous flux est fixée sur un mécanisme selon les deux variantes essentielles : tête fixe, pièce mobile ou inversement.

Ainsi que l'indique la figure 15, le courant est amené à l'électrode fusible par le tube-contact, ou guide-fil, sur les parois duquel elle frotte en permanence.

L'**opération de soudage** comprend les différentes phases :

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

Le flux en poudre et le fil continuent à être alimentés d'une façon régulière et l'arc s'établit sous la poudre, dans les vapeurs et sous le laitier liquide qu'il y crée, qui constituent ainsi la protection du métal en fusion. Le comportement particulier du flux, qui le distingue de l'enrobage (§ 2), réalise un certain confinement de l'arc et par suite :

- le rend invisible ;
- accroît son rendement ;
- élimine les projections.

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

Après soudure, le cordon est recouvert du laitier solide refroidi (figure 15), qu'il est nécessaire d'enlever par *piquage* (au moyen d'un marteau) et qui est lui-même recouvert du surplus de poudre non fondue dans l'opération et récupérable, après traitement éventuel, pour un nouvel emploi.

La consommation en poids de poudre est en pratique du même ordre que celle du fil lui-même.

L'emploi de poudre limite l'application du soudage sous flux à la **seule position à plat, éventuellement** (mais moyennant des artifices de retenue) **en corniche**.

Pendant le soudage, le flux s'appauvrit en éléments essentiels et doit être retraité avant réutilisation. Cela peut s'effectuer en cycle fermé par filtrage, séchage puis réalimentation.

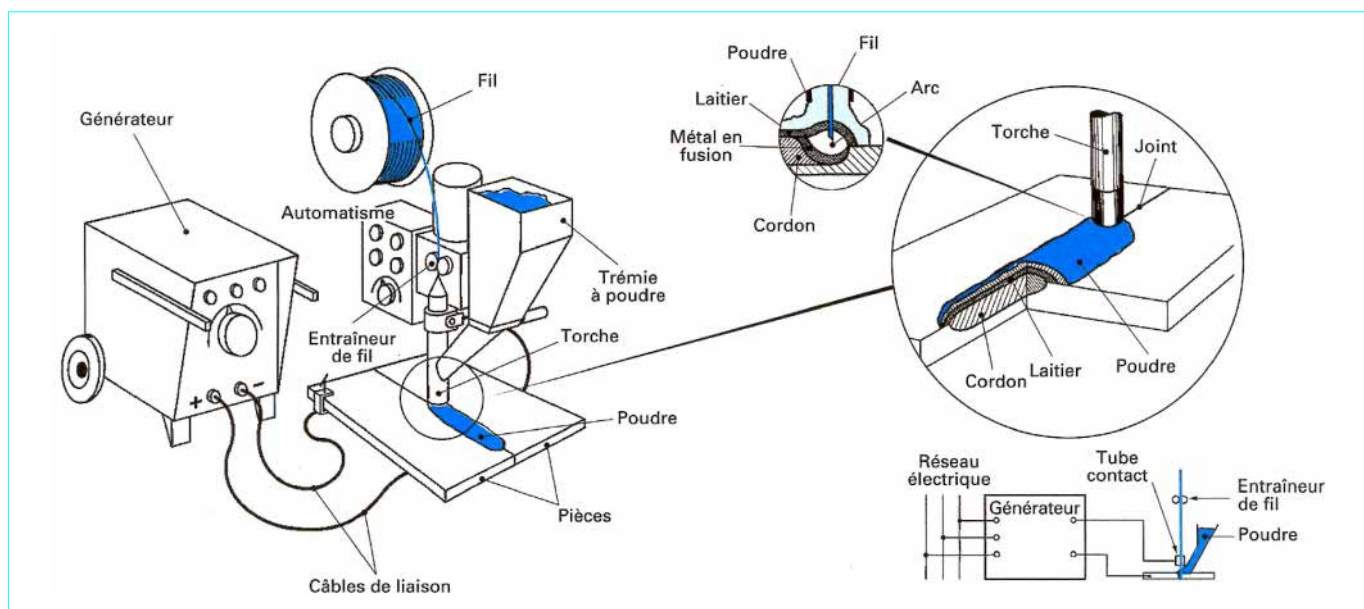


Figure 15 – Soudage sous flux en poudre : principe

Par ailleurs, si dans le soudage à l'électrode enrobée les qualités du fil et de l'enrobage sont, pour une électrode déterminée, fixées par le fabricant, il y a ici possibilité de *mixage*, encore qu'intervienne, comme on peut le comprendre aisément, une notion de **couples fil/flux** adaptés à tels types d'assemblages et de matériau : faiblement alliés, résistant à la chaleur, aciers inoxydables et réfractaires, à haute limite élastique ou pour une utilisation à basse température.

3.2 Caractéristiques du couple fil/flux

3.2.1 Fil

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

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

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

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

3.2.2 Flux

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

● Flux fondus ou préfondus (référence F)

Comme le nom d'indique, ils sont obtenus par fusion dans un four à haute température (1 300 à 1 400 °C) des divers constituants soigneusement dosés. Les pâtes très homogènes et refroidies sont ensuite broyées et tamisées pour obtenir la granulométrie désirée.

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

● Flux agglomérés (référence B)

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

● Flux mixtes (référence M)

On conçoit la possibilité d'obtenir des flux mixtes par mélange des deux types ci-dessus, en général mécaniquement.

■ Rôle du flux

● Rôle électrique

D'une manière générale et du fait de la physique même du procédé, les flux en poudre n'ont pas d'éléments diversement ionisables pour agir sur la tension d'arc et faciliter, comme dans les cas des électrodes enrobées, l'amorçage ou conférer à l'électrode des caractéristiques particulières dues à une forte ou à une faible tension. Dans le cas présent, les densités de courant sont beaucoup plus élevées et de tels effets sont moindres, voire inexistantes.

Cependant, et selon la composition du flux, on a constaté que la zone d'arc pouvait présenter des caractéristiques électriques différentes allant de la résistance pure à l'espace ionisé. Certains composants comme le manganèse fournissent en effet des vapeurs ionisables tandis que d'autres tels la magnésie ou l'alumine deviennent liquides et conducteurs et semblent donner lieu à une émission thermique du type effet Joule.

● Rôle métallurgique

— *Action directe* : selon la composition on distingue les flux actifs et les flux non actifs. Un flux est dit *actif* lorsqu'il est à l'origine des teneurs en manganèse et en silicium du métal déposé.

On distingue également, pour un flux déterminé, son caractère acide, basique ou neutre. Ce caractère est défini par des formules dont la plus connue, due à Tulliani, Boniszewski et Eaton est la suivante :

$$B_i = \frac{\text{CaO} + \text{CaF}_2 + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + 1/2 (\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 1/2 (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)}$$

Les *flux acides* à pourcentage élevé de silice (SiO_2) fournissent un laitier dense et visqueux et par suite des cordons de bel aspect. Le métal déposé a une bonne résistance à la fissuration et une résilience moyenne.

Les *flux basiques*, à faible pourcentage de silice, sont généralement riches en CaO , MgO , BaO , et fournissent un laitier fluide. L'aspect des soudures est moins régulier. L'action métallurgique est excellente et donne lieu à d'excellentes résiliences. Les flux basiques sont en général sensibles aux paramètres de soudage. Ils ne supportent pas de fortes intensités et n'ont pas d'aptitude particulière au soudage rapide et pénétrant.

Il existe des *flux chimiquement neutres* qui allient les propriétés des deux précédents.

— *Action indirecte* : comme pour les électrodes enrobées, c'est une action de protection de l'électrode en fusion, du bain et du métal en cours de refroidissement, par la formation d'un laitier vitrifié.

● Rôle mécanique

Du point de vue mécanique, le flux agit entre autres par sa densité, par sa viscosité et par sa granulométrie ; de là, les effets du flux sur l'aspect du cordon, sa forme, son profil et ses raccordements avec les bords soudés, ainsi que celui très important sur la compacité du métal déposé du fait du dégazage en cours de soudage.

Le soudage sous flux offre la possibilité de développer des puissances importantes et des bains volumineux et par suite d'obtenir les vitesses de soudage et les productivités les plus élevées de tous les procédés de soudage à l'arc.

3.2.3 Fusion du fil et dimensions du cordon

La courbe de la figure 16 donne le taux de dépôt moyen obtenu en soudage sous flux. On voit qu'il existe une certaine proportionnalité entre les intensités et la quantité de métal déposé et que l'on peut définir une constante de fusion, encore que cette notion ne soit pas utilisée dans ce procédé.

Les intensités extrêmes, pour chaque diamètre de fil, sont dans le rapport de 2,2 à 2,3 et c'est un des avantages, car cela permet une **grande liberté dans le choix du courant** qui peut être ainsi réglé pour un fil donné en fonction d'autres critères.

La **forte pénétration** obtenue permet d'employer des préparations en chanfreins peu ouverts (60° au lieu de 90°) et par suite obtenir des vitesses de soudage très élevées.

Dans ce procédé, il n'y a pas de notion de pertes de fusion ni de rendement de fusion et l'automatisme pratiquement inévitable de sa mise en œuvre élimine complètement l'influence de l'opérateur et les pertes de temps. Le rendement global est voisin de 1.

Les paramètres, ainsi que certaines conditions opératoires, influent d'une façon déterminante sur la forme du cordon et nous allons les examiner succinctement.

Les *paramètres* sont le courant, la longueur d'arc, contrôlée par sa tension, et la vitesse de soudage.

Les *conditions opératoires* sont l'inclinaison par rapport à l'horizontale et la longueur de sortie de l'électrode (*stick-out*).

■ Paramètres de soudage

● Courant

Selon ce qui a été précédemment exposé, l'accroissement du courant augmente la puissance dans l'arc et par suite la pénétration et le taux de dépôt (figure 17). L'expérience prouve que, par ailleurs,

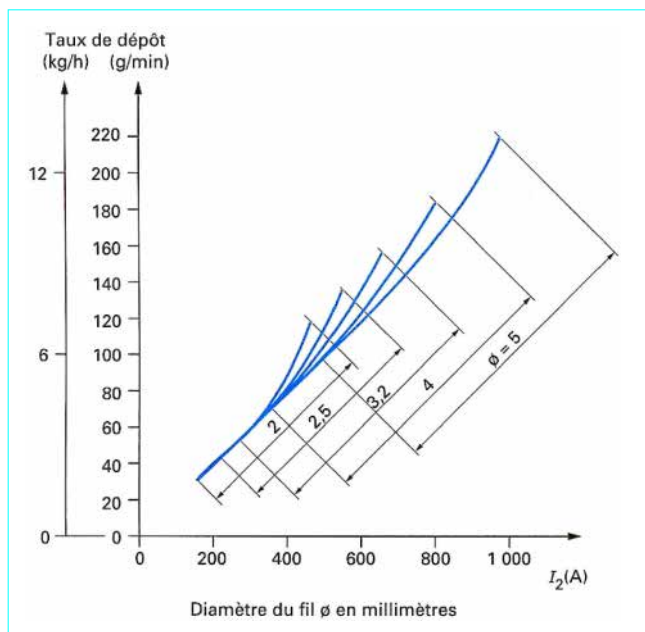


Figure 16 – Taux de dépôt moyen en soudage sous flux

le courant n'a qu'une faible influence sur la largeur du cordon et la surépaisseur. Cela provient essentiellement du confinement très important de l'énergie que réalise la protection, ce qui en contrepartie accroît la dilution.

L'examen de la figure 16 montre que, dans une certaine zone, il est possible d'intervenir sur la densité de courant sans modifier d'une manière sensible les autres paramètres. On augmente la densité en passant, pour le même courant, d'un diamètre de fil au diamètre inférieur. On obtient une température plus élevée et un accroissement de la pénétration et de la dilution.

On a observé que, comme avec l'électrode enrobée, on pouvait utiliser du courant continu ou alternatif. Le courant continu est d'un emploi plus aisé et donne lieu à un meilleur amorçage, une stabilité supérieure et une meilleure qualité du cordon.

Le courant alternatif, insensible au soufflage magnétique, est surtout utilisé avec des torches en tandem dans les têtes multiples.

Les intensités de courant sont comprises entre 200 et 600 A ou plus.

● Longueur d'arc

En augmentant la longueur d'arc :

- on augmente évidemment sa tension et la largeur du cordon ;
- on diminue la pénétration et la dilution ;
- on augmente la consommation du flux.

Le paramètre longueur est intéressant en pratique pour ajuster dans certaines situations l'efficacité du soudage :

- accroissement de la pénétration dans les premières passes ;
- étalement du cordon dans les dernières passes ;
- action sur les morsures et la fissuration.

La longueur d'arc ayant un effet sur la quantité fondue de flux, elle a donc une influence sur la composition métallurgique et par suite sur les propriétés de la soudure.

Les tensions d'arc sont comprises entre 20 et 45 V.

● Vitesse de soudage

En augmentant la vitesse de soudage, on diminue la largeur du cordon, la surépaisseur, la pénétration et la dilution.

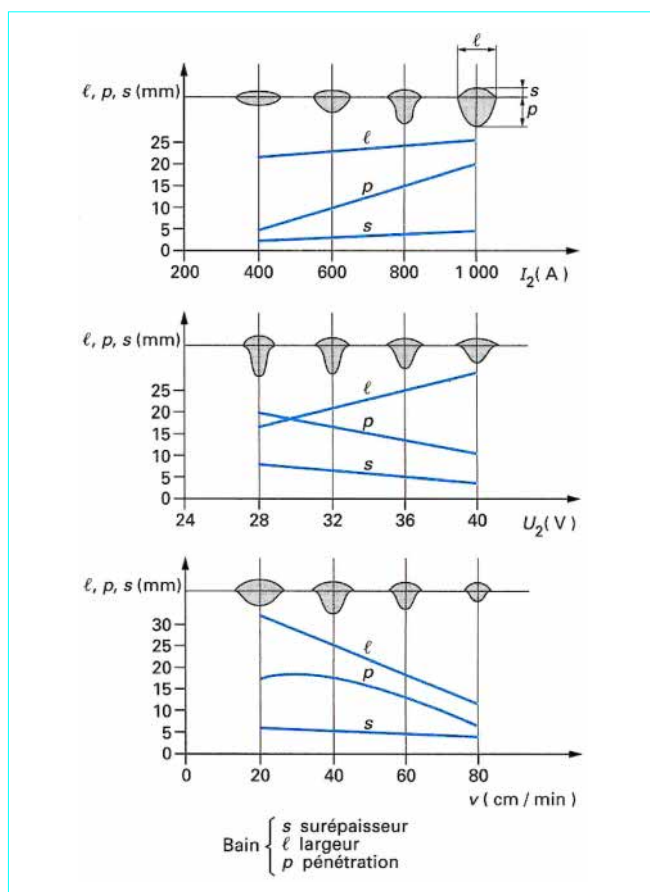


Figure 17 – Influences paramétriques du soudage sur les dimensions du cordon

Les vitesses de soudage sont réglables sur une très grande gamme, de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres par minute.

■ Conditions opératoires

● Inclinaison

Du fait de l'importance des dimensions de bain fondu, l'incidence de l'inclinaison du soudage par rapport à l'horizontale est très marquée. La figure 18 schématise cette influence qui se caractérise de la façon suivante :

- en montant (figure 18a) : accroissement de la pénétration, rétrécissement du cordon et surépaisseur accrue ;
- en descendant (figure 18b) : affinement du cordon et diminution de la pénétration.

L'inclinaison ne doit pas dépasser 20 %. Ainsi, on soudera en montant les fonds de cordon et en descendant à grande vitesse les épaisseurs faibles. En soudage circulaire, cette influence est très facile à mettre en évidence.

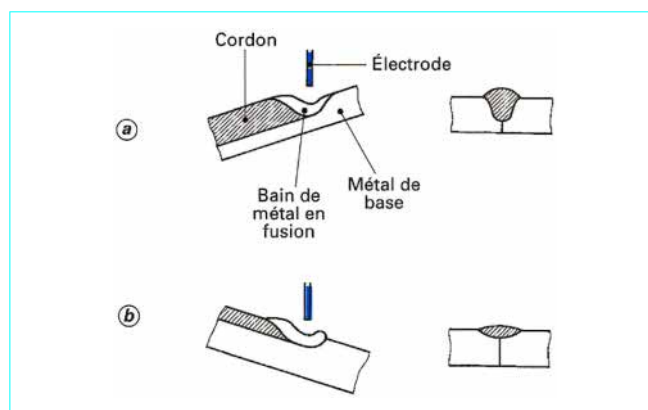


Figure 18 – Effets comparés de l'inclinaison du soudage

● Longueur de sortie de l'électrode (par rapport au contact électrique)

Cette partie de l'électrode s'échauffe ou se préchauffe plus ou moins par effet Joule et cela a une certaine incidence sur la fusion en déséquilibrant la répartition calorifique naturelle de l'arc. Ainsi un accroissement de la longueur de sortie augmente le taux de dépôt et diminue la pénétration. Cet effet est particulièrement recherché en rechargement.

Nota : le rechargement consiste à déposer du métal en vue de lutter contre l'oxydation superficielle ou de restituer les parties usées des pièces (cf. rubrique *Traitements de surface* dans le traité Matériaux métalliques).

Les longueurs normalement utilisées en soudage sont de 20 à 50 mm selon le diamètre du fil. Les longueurs maximales peuvent atteindre 100 mm et nécessitent un guidage particulier du fil.

3.3 Domaines d'applications

Le soudage sous flux se place, par rapport au soudage à électrode enrobée, avec pratiquement les mêmes avantages quant à son adaptativité métallurgique, mais il résout le problème de la productivité par :

- son *fonctionnement continu* grâce au fil-électrode ;
- son *taux de dépôt supérieur*.

Cela le cantonne dans le domaine de la **chaudronnerie moyenne et lourde** et, de façon générale, dans les **applications dans lesquelles** :

- **les épaisseurs sont élevées** (> 30 à 50 mm) et, par suite, les chanfreins importants ;
- **les soudures sont longues** (plusieurs mètres) **et uniformes** (absence d'angle).

Ce procédé n'est **pratiquement pas utilisé manuellement** à cause des amenées de flux et de fil qui forment, au niveau de la torche, un appareillage lourd et difficilement manœuvrable. Il se prête, par contre et naturellement, car c'est pour cela qu'il a été développé, à la **mécanisation du soudage** pour laquelle la position à *plat*, nécessaire à la retenue du flux, est facile à observer. C'est ainsi que se sont développés des moyens appropriés tels que les vireurs, les positionneurs, les potences et autres chariots automoteurs (§ 7), appropriés à la manipulation de la tête ou de pièces lourdes. Il n'est pas utilisé en extérieur sur chantiers.

4. Soudage semi-automatique MIG et MAG

Caractères principaux :

Électrode : fil métallique fusible dévidé d'une façon continue.

Protection : apport gazeux inerte ou faiblement actif.

Nature du courant : continu ou pulsé.

4.1 Description du procédé

La figure 19 représente une installation de **soudage semi-automatique**, procédé que l'on désigne également par les expressions **MIG** et **MAG** selon que le gaz est respectivement inerte ou actif (*Metal Inert Gas* et *Metal Active Gas*). Dans les pays anglosaxons, on utilise aujourd'hui de préférence et indifféremment les expressions suivantes : *semi-automatic welding*, *gas metal arc welding* ou *GMA*, *gas shielded arc welding process*.

Le soudage semi-automatique s'apparente par le fil électrode au soudage sous flux. Bien que parfois actif, le gaz de protection joue un rôle métallurgiquement beaucoup plus restreint que le flux mais **simplifie la mise en œuvre** du procédé.

L'appareillage comporte : une source de courant continu, un ensemble de dévidage d'une bobine de fil constitué par un dévidoir et un entraîneur, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires.

L'arc étant visible, les accessoires de protection sont identiques à ceux du soudage à l'électrode enrobée (§ 2).

La torche a pour rôle de guider le fil sur la soudure et d'amener le courant à son extrémité par un *tube-contact* de la même façon qu'en soudage sous flux. Lors du soudage, l'appui sur la gâchette

commande l'ouverture automatique de la vanne de gaz, la fermeture du contacteur qui met le générateur sous tension faisant apparaître la tension à vide, et également le moteur de l'entraîneur qui dévide le fil. L'arc s'amorce au contact électrode-pièce et la fusion s'installe instantanément pour former le cordon.

L'avance du fil-électrode à vitesse constante, conjuguée avec la caractéristique horizontale du générateur (§ 1.1), rend le fonctionnement de l'arc et le processus de fusion *indépendants de l'opérateur* dont le seul rôle ne réside plus que dans le guidage du cordon sur le joint, d'où le *caractère semi-automatique du soudage manuel*.

Le cordon ne se recouvre d'aucun laitier après soudage ; c'est un des avantages de ce procédé qui **peut se conduire dans toutes positions**.

Le soudage semi-automatique peut s'automatiser facilement. Il peut s'appliquer sur la presque totalité des matériaux soudables sans grande difficulté pour le mettre en œuvre, de là son intérêt dans tous les domaines industriels.

4.2 Caractéristiques du couple fil/protection gazeuse

4.2.1 Fil

L'électrode est, comme pour le soudage sous flux, un fil, de grande longueur, enroulé sur un touret ou une bobine isolante, dont le matériau correspond au métal à souder (acier doux ou allié, acier inoxydable, alliage d'aluminium ou de cuivre).

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

Les diamètres normalisés vont de 0,6 à 2,4 mm, voire 3,2 mm.

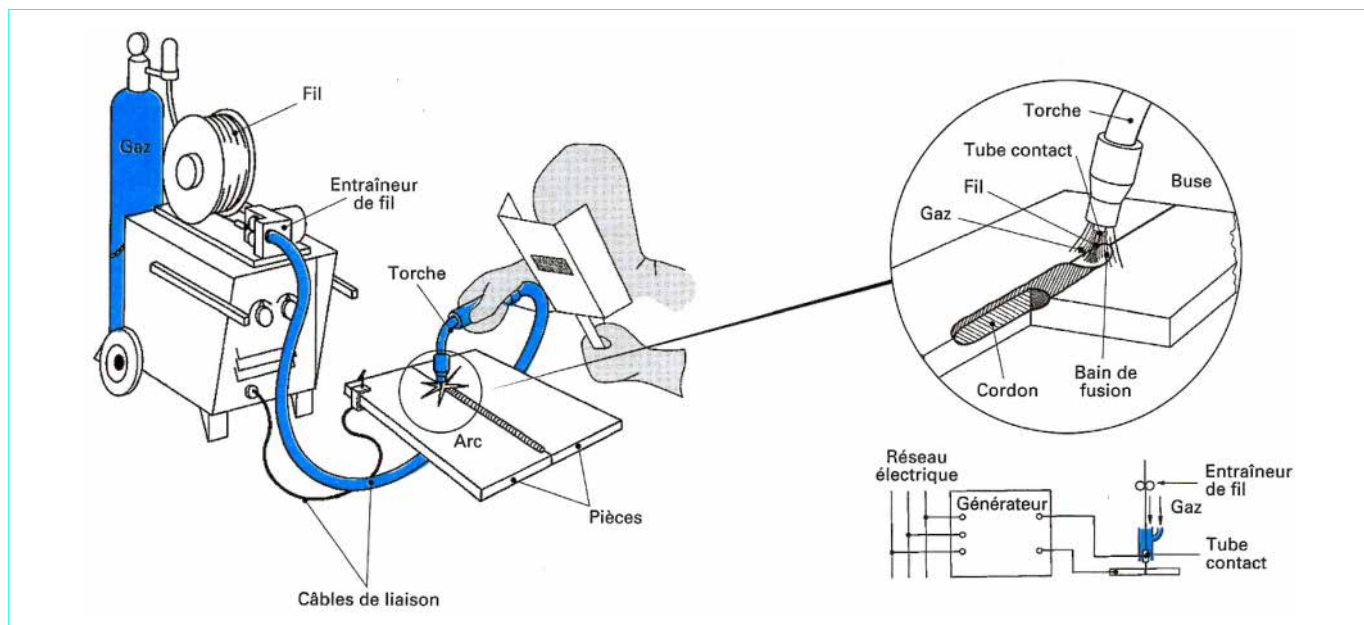


Figure 19 – Soudage semi-automatique : principe

4.2.2 Protection gazeuse

La protection gazeuse est, selon le cas, *inerte* ou *active* et *oxydante* (les protections réductrices sont peu utilisées). C'est ce qui établit la distinction d'appellation MIG (inerte) ou MAG (actif) dans l'utilisation du procédé, le matériel de soudage ne présentant pas, par ailleurs, de différences notables. Les protections gazeuses communément employées sont données dans le tableau 3.

Les producteurs et distributeurs de gaz de soudage proposent des mélanges prêts à l'emploi soit à la demande des utilisateurs, soit avec des proportions et des additifs qu'ils ne divulguent pas et auxquels ils donnent une marque de fabrique.

De même que pour les autres procédés, la protection gazeuse joue différents rôles.

Rôle électrique

Le potentiel d'ionisation varie d'un type de protection à l'autre. Ainsi d'environ 16 V pour l'argon pur, il est de 25 V pour l'hélium et cela explique la pénétration supérieure que permet ce dernier. Ces deux gaz produisent des conditions énergétiques conduisant à des transferts par pulvérisation (*spray arc*), généralisés pour les métaux non ferreux surtout.

L'addition, directe ou par l'intermédiaire de CO_2 , d'oxygène à l'argon abaisse plus ou moins la tension et la puissance de l'arc et agit sur le mode de transfert, qui s'effectue alors par gouttes avec possibilité, par action sur les paramètres électriques, d'en modifier le volume et la fréquence.

On peut, à la limite, en diminuant la tension délivrée par le générateur, obtenir un transfert globulaire avec mise en court-circuit de celui-ci. Cette situation est physiquement recherchée, car elle permet de souder des épaisseurs très faibles et d'étendre considérablement le domaine d'application du procédé MAG. On l'appelle *soudage à arc court* (*short arc*).

Rôle métallurgique

Il s'entend pour les mélanges actifs, c'est-à-dire dans le cas du soudage MAG. L'origine des mélanges actifs vient en grande partie de la recherche d'une protection mieux appropriée que l'argon dans l'application du procédé au soudage des aciers. L'emploi du CO_2 est possible moyennant une adaptation des sources de courant ainsi que des fils d'apport.

De telles qualités de fils se sont généralisées et conviennent parfaitement au soudage sous argon additionné d'oxygène, voire de CO_2 , avec des effets sur le mode de transfert du métal, en particulier, et sur les caractéristiques de soudures.

Dans les applications du procédé aux métaux réfractaires, aux alliages d'aluminium et de magnésium, la protection gazeuse est essentiellement inerte et constituée par de l'argon ou de l'hélium (§ 5), et le procédé est le MIG.

Rôle mécanique

Le gaz de protection est apporté au niveau de la torche par une buse annulaire. Il peut l'être dans certains cas par une arrivée latérale. L'arrivée de gaz comporte un effet de souffle qui peut être mis à profit, si besoin.

Le débit et la pression du gaz sont les paramètres indépendants, qui sont à déterminer en fonction de la protection qu'il doit assurer. Des débits de 10 à 20 L/min sont couramment utilisés. La consommation et le prix du gaz sont des facteurs économiques importants de l'emploi du procédé.

4.2.3 Fusion d'un fil

On a représenté sur la figure 20, à titre d'exemple, les caractéristiques de fusion de fils d'aciers et de fils d'alliages légers. Les matériaux courants sont fusibles sous gaz avec des taux de fusion variables selon le cas et par suite le procédé s'applique largement dans tous les domaines.

Tableau 3 – Protections gazeuses utilisées en soudages MIG et MAG

Procédé	Gaz	Applications
MIG	Ar	Tous métaux en principe
	He	Alliages d'aluminium
	Ar + He	Alliages d'aluminium et de nickel
MAG	Ar + 1 à 2 % O_2	Aciers au carbone avec fils désoxydants
	Ar + 3 à 5 % O_2	
	Ar + 20 à 30 % CO_2	
	Ar + 5 % O_2 + 15 % CO_2	
	CO_2	
	CO_2 + 5 % O_2	

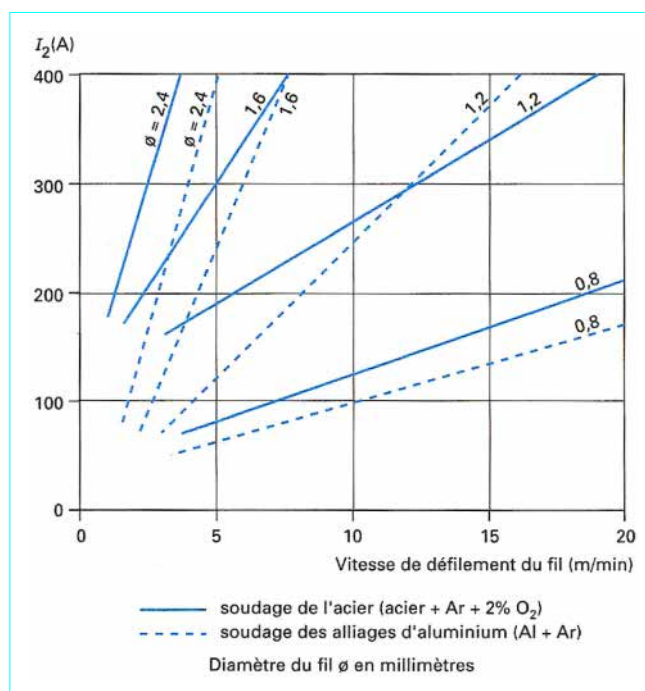


Figure 20 – Caractéristiques de fusion du fil

La gamme des intensités et l'emploi de fils de petits diamètres réservent cependant le procédé à une utilisation sur des épaisseurs faibles (quelques millimètres). **Il couvre en pratique toutes les possibilités du soudage à l'électrode enrobée, mais reste limité par rapport au soudage sous flux qu'il complète en bas de gamme.**

4.2.4 Conditions de soudage

Le soudage MIG ou MAG emploie exclusivement du courant continu, le pôle positif à l'électrode. Le générateur a des caractéristiques secondaires horizontales (plates) et son réglage porte sur la tension secondaire à vide, proche de la tension d'arc. La puissance est alors réglée par la vitesse du fil qui détermine automatiquement le courant de soudage. De là le nom de **soudage semi-automatique**, pour lequel le soudeur assure uniquement le guidage de la torche contrairement au soudage manuel.

En pratique, les conditions de soudage partent de la nature des matériaux à souder et de leurs épaisseurs qui déterminent la qualité de fil, son diamètre et une fourchette de courant. La tension du générateur est ensuite réglée pour ajuster la longueur d'arc.

On distingue trois modes de fonctionnement : statique, en arc court, en courant pulsé.

■ Fonctionnement statique

La tension et le courant sont constants et stables (l'arc est dit *calme*). Ces conditions se rencontrent lorsque le transfert de métal s'effectue par pulvérisation. Cette situation est celle des fortes intensités (300 à 400 A) et des applications sur fortes épaisseurs (de l'ordre du centimètre).

■ Fonctionnement en arc court

La recherche d'un gaz de protection moins onéreux que l'argon ou l'hélium pour des applications courantes sur acier a fait apparaître que le CO_2 est à même de résoudre le problème. Mais la puissance dans l'arc est réduite et, pour un diamètre de fil donné, le transfert s'effectue alors nécessairement par gouttes. À la limite, l'arc devient erratique. L'adjonction d'une inductance est alors essentielle dans la limitation des pointes de courant et des projections. Ce fonctionnement dit *en arc court* a permis d'appliquer le procédé à des assemblages de tôles d'acier minces (carrosseries). Sur la figure 21 sont représentées les formes de la tension et du courant en corrélation avec le transfert d'une goutte.

■ Fonctionnement en courant pulsé

En observant les variations de l'intensité instantanée, on a compris que les pointes de courant au moment du court-circuit jouaient un rôle dans la formation et la projection des gouttes, d'où l'idée de pulser le courant afin de gouverner le phénomène de transfert et de le régulariser. Les générateurs modernes à transistors apportent une réponse à cet objectif. Ils ont permis de souder des épaisseurs faibles, d'absorber de plus grands écarts d'accostage et de souder en position.

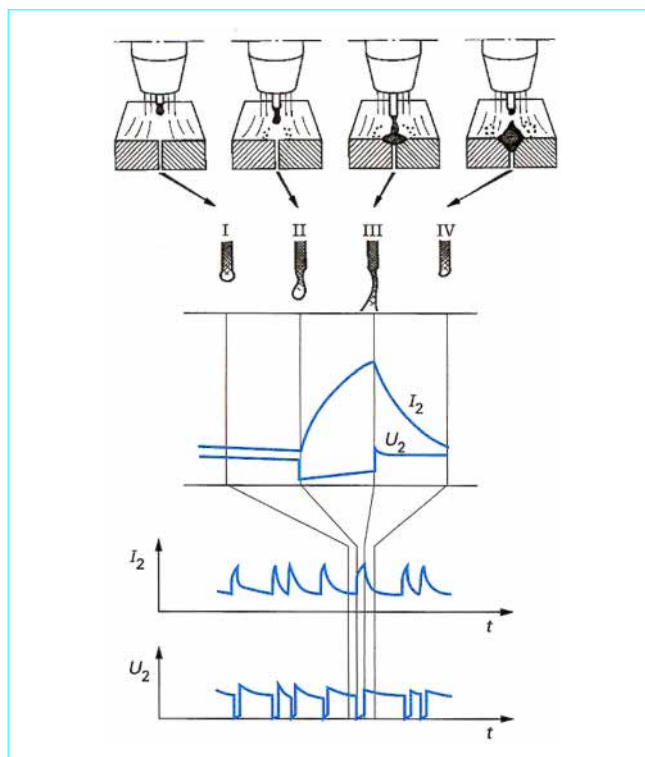


Figure 21 – Formation du courant et de la tension en arc court

4.3 Domaines d'applications

Le soudage MIG/MAG est né de l'intérêt d'appliquer au soudage à l'électrode continue, à la place de la poudre minérale, une protection gazeuse. En fonctionnement manuel, il offre, par rapport au soudage à l'électrode enrobée, l'**option dite semi-automatique** dans laquelle l'opérateur n'a de rôle que dans le guidage de la torche et n'en a plus aucun dans la fusion de l'électrode.

L'emploi de CO_2 en *short arc* constitue une avancée pratique très importante qui a permis au procédé de s'imposer dans le domaine des épaisseurs minces d'aciers au carbone peu ou faiblement alliés constituant la base de la **chaudronnerie légère, de la petite et moyenne mécano-soudure et de la serrurerie industrielle**. Il s'est développé dans la **construction automobile** sous forme semi-automatique mais surtout automatique à laquelle il est parfaitement adapté.

Il offre toutes les possibilités du soudage manuel quant aux *positions d'emploi* en corniche, au plafond, etc. L'absence de laitier rend le **travail plus propre et sans reprise de finition**, car la fusion *spray arc* permet d'obtenir des *surfaces de dépôt très lisses*.

Le soudage MIG est la solution semi-automatique et automatique des assemblages en alliages d'aluminium et en aciers inoxydables dans la chaudronnerie des réservoirs transportés, des silos propres et des conteneurs des industries agro-alimentaires.

Malgré les tentatives faites dans la composition des fils et des gaz, très vite limitée en comparaison avec les flux ou les enrobages, les soudures MIG/MAG ne sont pas performantes du point de vue mécanique (*manque de compacité*) et métallurgique (*appauvrissement des liaisons en éléments d'apport*). Le procédé n'est donc pas pris en considération dans les cas critiques.

5. Soudage à l'électrode réfractaire (TIG)

Caractères principaux :

Électrode : tige de tungstène non fusible.

Protection : gaz inerte.

Nature du courant : alternatif ou continu.

Apport de métal : pas d'apport ou apport séparé.

5.1 Description du procédé

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé **soudage TIG** (*Tungsten Inert Gas*). Dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par *GTAW* ou *Gas Tungsten Arc Welding*. On le désigne souvent en France par **soudage à l'argon**.

Le principe du soudage à l'électrode réfractaire est représenté sur la figure 22 sous sa forme manuelle.

L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires.

Un arc TIG est visible et nécessite une protection.

L'opération s'exécute avec ou sans apport de métal :

— sans apport de métal, l'opérateur tient la torche d'une main et de l'autre le masque de protection ;

— avec apport de métal (fil métallique), l'opérateur tient la torche d'une main, introduit de l'autre le fil d'apport dans le bain de fusion ; dans ce cas il a un casque spécial (figure 22). En polarité directe, l'électrode est meulée en pointe côté soudage (figure 23). Elle se forme en boule pour le soudage des alliages d'aluminium en courant alternatif ou en polarité inverse.

L'opération se conduit de la façon suivante : l'opérateur place la torche en regard du point de départ en prenant soin de maintenir l'extrémité de l'électrode à quelques millimètres du métal à fondre, valeur approximative de la longueur d'arc. Il actionne ensuite l'interrupteur de torche, ce qui a pour effet d'ouvrir le circuit du gaz, de fermer le contacteur de la source, la tension à vide apparaissant alors entre pièce et électrode, puis de fermer le circuit d'amorçage.

Ce circuit a pour rôle de produire entre l'électrode et la pièce une étincelle de faible puissance et de haute fréquence, pendant le temps (très bref) nécessaire à l'établissement du courant de soudage dans le circuit. Le bain fondu se forme et l'opération de soudage peut alors se conduire.

Le soudage TIG produit une **simple fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration**. On réalise un **apport de métal** en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Ce fil qui fond dès son arrivée n'a aucune liaison avec le circuit de soudage. Il n'est pas une électrode et **son taux de dépôt est indépendant de la puissance de l'arc**. Ce fait est une des caractéristiques importantes du procédé à électrode réfractaire qui le distingue des procédés à électrodes fusibles.

De même que les procédés à fils fusibles, **le procédé TIG peut s'automatiser facilement**.

Le procédé TIG s'applique à tous les métaux soudables. Les courants généralement employés vont de quelques ampères à 400 A environ en courant continu (pour le soudage du cuivre, les intensités nécessaires sont de l'ordre de 600 à 800 A). En courant alternatif, la gamme utile est comprise entre 5 et 525 A. Sa puissance limitée à une vingtaine de kilowatts et son apport de métal séparé le réservent à des épaisseurs généralement faibles, de quelques

millimètres. Son coût élevé, relativement aux autres procédés et dû essentiellement au coût du gaz de protection, fait qu'on le **réserve aux applications requérant qualité et précision**.

5.2 Caractéristiques du couple électrode/protection gazeuse

5.2.1 Électrode

Le **tungstène**, pur ou additionné de thorium (1 à 2 %) et/ou de zirconium (0,5 %), **est l'unique matériau susceptible de constituer l'électrode réfractaire du procédé TIG** (tableau 4). Compte tenu des densités de courant admissibles, les électrodes de tungstène ont des diamètres de quelques millimètres. Les longueurs, de quelques décimètres, sont déterminées par les dimensions des torches.

L'addition de thorium fournit à l'électrode une meilleure émissivité, une meilleure densité de courant, une meilleure résistance à la contamination et par suite une plus longue durée d'emploi.

Le tableau 4 donne les intensités recommandées selon le diamètre, le type d'électrode et la nature du courant. Ces conditions permettent de maintenir chaque électrode dans le domaine thermique optimal de fonctionnement et d'obtenir une bonne stabilité et un bon amorçage.

En service, l'électrode se pollue plus ou moins vite selon les impuretés existant sous forme de traces dans le gaz de protection ou du fait d'une protection défectueuse provenant d'un mauvais réglage du débit de gaz, ou de fuites dans le circuit ou à la torche.

Tout contact fortuit de l'électrode avec le métal, pendant le soudage, est également une cause de pollution.

La qualité et la pureté de l'électrode sont des éléments essentiels dans l'obtention et le maintien des conditions de soudage. Tout incident en encrassement doit donner lieu à un réaffûtage.

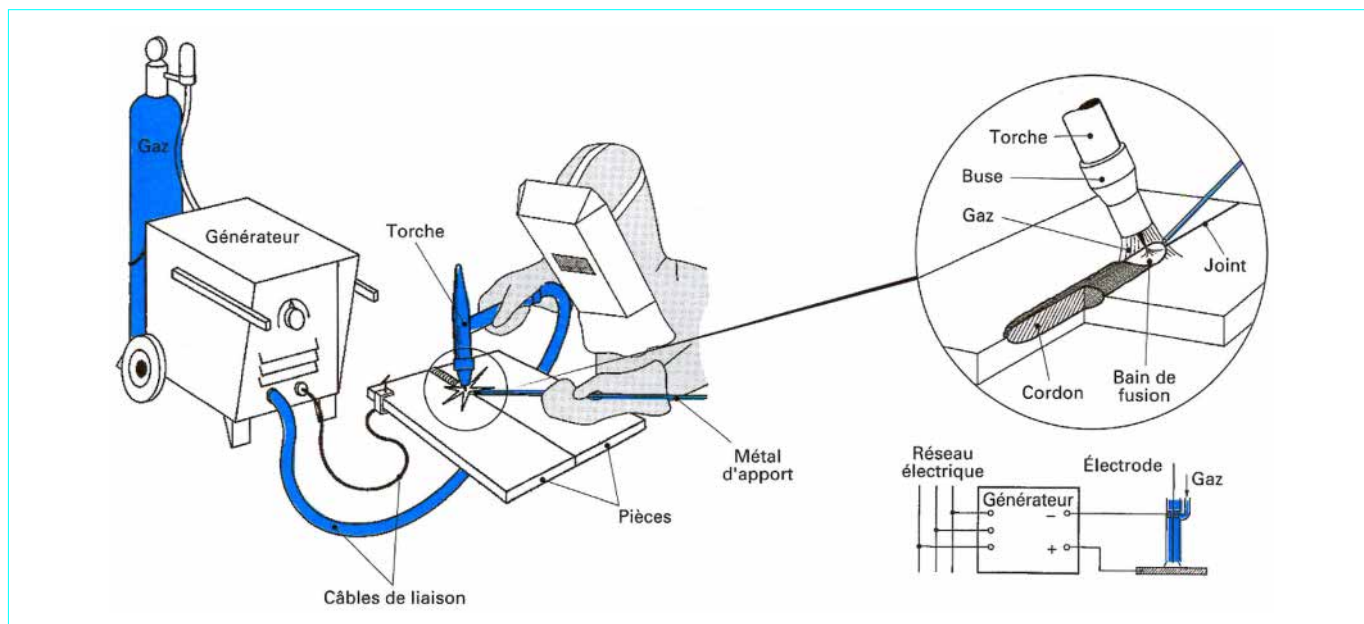


Figure 22 – Soudage à l'électrode réfractaire : principe

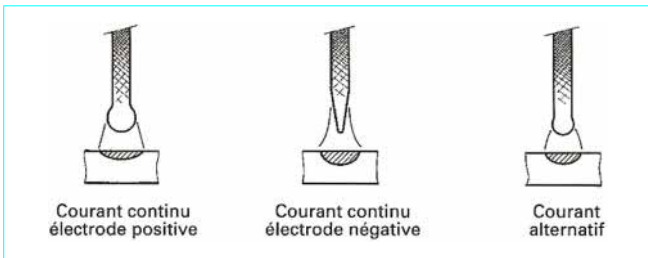


Figure 23 – Formes des électrodes pour soudage TIG

Tableau 4 – Emploi des électrodes en tungstène en soudage TIG				
Diamètre de l'électrode (mm)	Courant continu		Courant alternatif	
	Polarité directe (1) (A)	Polarité inverse (1) (A)	Tungstène pur (A)	Tungstène thorié (A)
0,5	5 à 20	.....	10 à 20	5 à 20
1	15 à 18	.....	20 à 30	20 à 60
1,6	70 à 150	10 à 20	30 à 80	60 à 120
2,4	150 à 250	15 à 30	60 à 130	100 à 180
3,2	250 à 400	25 à 40	100 à 180	160 à 250
4	400 à 500	40 à 55	160 à 240	200 à 320
4,8	.....	.....	190 à 300	290 à 390
6,4	.....	.....	250 à 400	340 à 525

(1) Tungstène pur ou thorié.

5.2.2 Protection gazeuse

Les seuls gaz inertes utilisables du fait de leurs caractéristiques dans le procédé TIG sont l'argon et l'hélium (tableau 5). On peut également employer un mélange des deux et obtenir un compromis entre leurs effets respectifs, ou les additionner d'un réducteur.

L'argon-soudage et l'hélium-soudage ont une pureté de 99,95 %. L'hélium existant sous forme naturelle aux États-Unis, son emploi s'y trouve généralisé. Ailleurs, ces gaz sont obtenus par distillation et de ce fait l'argon, moins cher, y est préféré.

La pression de gaz peut avoir un effet sur la pénétration en creusant davantage le bain fondu.

Dans la majorité des applications, les débits de gaz ramenés à la pression atmosphérique sont de l'ordre de 10 à 20 L/min ou 40 à 70 m³/h. Les vitesses de soudage étant généralement de 0,3 m/min, le coût en 1995 de la consommation en gaz est de 1,2 à 2,4 F/m de soudure avec de l'argon et 2,5 à 5 F/m avec de l'hélium.

Par rapport à l'hélium, l'argon a les avantages suivants : arc plus calme, meilleure action décapante du soudage alternatif des alliages d'aluminium, nécessité d'un débit moindre pour une protection identique et amorçage plus facile.

En revanche, l'hélium fournit une puissance plus élevée et donne une meilleure pénétration (§ 1).

5.2.3 Métal d'apport

Les soudures en chanfrein nécessitent un apport de métal. Celui-ci est introduit directement à l'avant du bain, soit à partir de baguettes nues, en soudage manuel, soit par un dispositif mécanisé semblable à celui du soudage MIG.

Tableau 5 – Emploi des gaz en soudage TIG		
Gaz	Qualité du gaz	Applications en soudage
Argon	Inerte	Toutes applications
Hélium	Inerte	Aluminium et cuivre
Argon-hélium (20 %-80 % ou 50 %-50 %)	Inerte	Aluminium et cuivre, avec arc plus stable que cas précédent
Argon-azote (75 %-25 %)	Réducteur	Cuivre essentiellement
Argon-hydrogène (1 %)	Réducteur	Acier inoxydable

5.2.4 Conditions de soudage

■ Courant d'arc

On peut employer en soudage TIG l'un des trois arrangements suivants (figure 23) :

- *courant continu-électrode négative*, le plus employé, appelé également soudage en polarité directe (DCSP, *direct current straight polarity*) ;
- *courant continu-électrode négative*, rarement utilisé, appelé également soudage en polarité inverse (DCRP, *direct current reverse polarity*) ;
- *courant alternatif*, utilisé pour les alliages d'aluminium et de magnésium.

Du fait de l'absence de transfert de métal, il n'y a pas d'interaction entre le phénomène et la source, et la stabilité de l'arc est remarquable.

L'emploi de sources à caractéristiques externes verticales rend le courant indépendant de la tension d'arc ($\Delta i \approx 0$). On dispose d'un procédé particulièrement souple et très facile d'emploi, riche en possibilités (figure 24).

● Courant continu, polarité directe

Le courant peut être continu ou pulsé (figure 25a).

— continu : c'est en réalité un courant constant affecté d'une ondulation caractérisée par son taux T , qui résulte de la technologie du générateur, surtout lorsqu'il est un redresseur polyphasé. C'est alors une fonction périodique alternative à la fréquence du réseau ou à l'un de ses multiples. La présence d'une ondulation de courant se traduit par l'apparition d'ondulation de fusion à la surface du cordon ; elle n'est pas gênante lorsqu'elle est limitée. Dans le cas contraire, elle peut correspondre à un élargissement inutile en surface de la zone thermiquement affectée ;

— pulsé : l'intensité prend la forme de crêneaux successifs ou pulsations dont on règle la durée, l'intensité et la fréquence. La soudure s'effectue par fusions successives superposées et parfaitement contrôlées grâce à un gradient de température plus élevé. On maîtrise mieux la fusion, car on est moins sensible à l'environnement thermique des montages.

La modulation est utilisée avec bénéfice dans les cas suivants : soudage d'épaisseurs inégales, en position, d'alliages d'aluminium ou en accostage difficile.

Les générateurs modernes à transistors sont dotés de la fonction *courant pulsé*. De plus, il est également possible de pulser l'arrivée de fil d'apport à la même fréquence et cela apporte de nouveaux paramètres dans l'emploi de ce procédé.

● Courant continu, polarité inverse

La pièce devient cathode. Son pouvoir émissif est essentiel dans la conduite de ce type de soudage. Dans le cas des alliages d'aluminium, la polarité inverse a un effet décapant par destruction des oxydes, libération d'oxygène et d'électrons de liaison. La température à la pièce est moindre, et cela permet de diminuer ses effets, si besoin est, (métaux tendres, microsoudage).

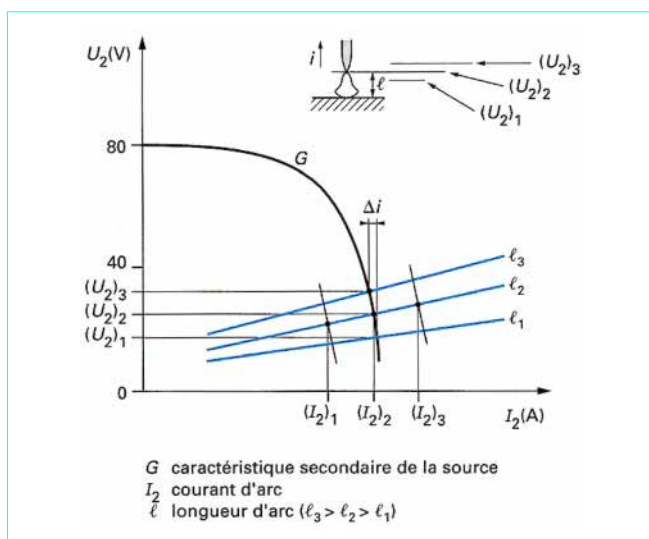


Figure 24 – Caractéristiques du soudage TIG

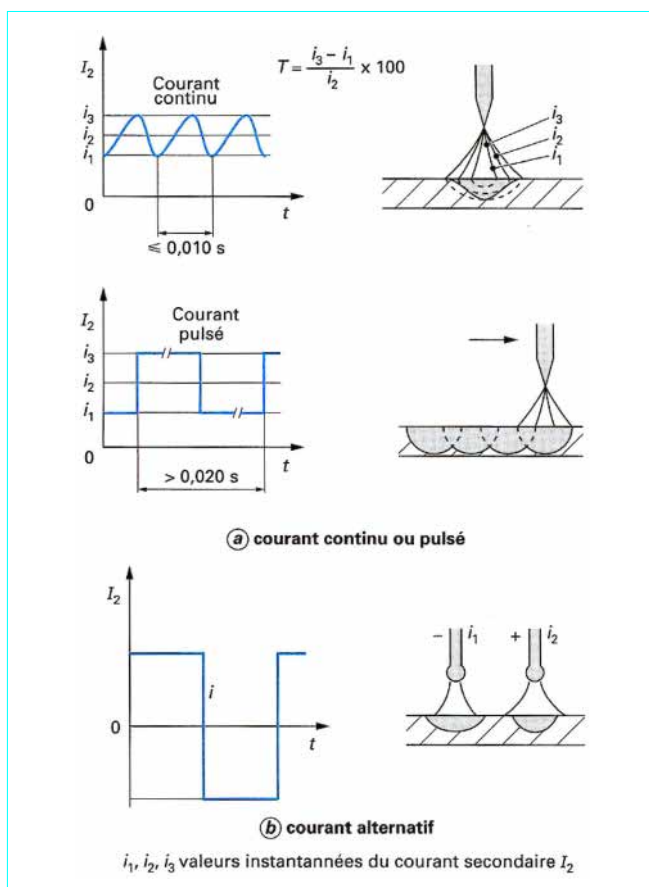


Figure 25 – Effet du courant continu ou alternatif sur la soudure

● Courant alternatif

Il allie les deux effets précédents (figure 25b) et se justifie essentiellement dans le soudage des alliages d'aluminium et de magnésium. En fait, jusqu'à ces derniers temps, cette situation a été facilement obtenue par l'emploi de générateurs alternatifs à 50 Hz et pouvant fournir, grâce à des concepts électrotechniques, des ondes carrées. Actuellement, l'électronique de puissance permet de réaliser des générateurs délivrant une polarité variable plus appropriée. La séquence la plus efficace consiste à diminuer le temps inverse autour de 3 ms, d'augmenter le courant correspondant à 1,3 fois l'intensité directe, réglée elle pour une durée de 20 ms. L'effet décapant est obtenu sans affecter l'effet thermique principal.

■ Tension d'arc

Si l'on peut gouverner le courant avec beaucoup de précision et de souplesse, il faut se rappeler que l'effet thermique résultant est également fonction de la longueur d'arc (figure 26) ; celle-ci doit donc être maintenue constante et/ou régulée avec précision. Cela est possible et nécessaire en utilisation automatique. Les machines sont pour cela équipées d'un système de régulation de tension d'arc qui est un système motorisé agissant sur la position de la torche par rapport à la pièce et par suite sur la longueur d'arc, en vue de maintenir la tension constante pour un courant donné.

■ Amorçage

La nécessité d'un amorçage particulier à distance est une des caractéristiques du soudage TIG. Des dispositifs à éclateurs produisant à l'électrode des décharges sont généralisés car peu coûteux.

Dans les installations spéciales, ils sont remplacés par des circuits à impulsions, plus puissants, plus efficaces et ne perturbant pas, par rayonnement électromagnétique, l'espace avoisinant.

5.3 Domaines d'applications

Le soudage par procédé TIG doit se comparer au soudage MIG/MAG car, bien que différent dans le principe, il développe la même puissance et devrait par suite donner lieu à des résultats comparables. Mais ses avantages et ses inconvénients font qu'il trouve ses applications dans des domaines distincts.

Ses avantages technologiques sont essentiellement dus au fait que *l'échauffement et l'arrivée de fil sont indépendants*. Par suite :

- une torche TIG est un chalumeau puissant et précis permettant des fusions sans métal d'apport, impossibles à traiter autrement que par plasma (§ 6.1) ;
- l'apport de métal peut être réglé indépendamment de la puissance de l'arc et de l'énergie dispensée.

L'emploi de gaz onéreux, comme l'argon ou l'hélium, fait que ses applications sont **réservées aux métaux et assemblages nobles** : aciers inoxydables et réfractaires, alliages de nickel, alliages d'aluminium et de magnésium, de titane, de cuivre, etc.

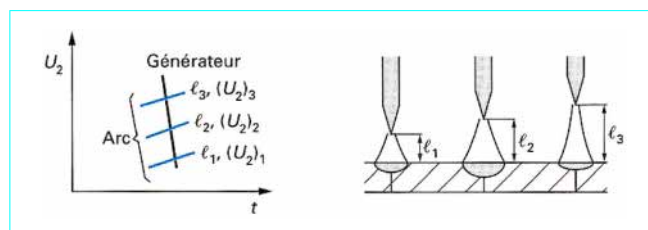


Figure 26 – Effet de la longueur d'arc sur la tension

D'exécution lente à des vitesses ne dépassant pas quelques dizaines de centimètres par minute, il autorise, par un excellent dosage thermique, les **travaux de haute qualité** et, par un contrôle facile des paramètres, les travaux **de grande précision**. C'est le procédé de soudage à l'arc de la **construction aéronautique**.

À l'inverse, la productivité est médiocre et n'est pas un facteur qui puisse intervenir.

6. Procédés dérivés

6.1 Soudage au plasma

Caractères principaux :

Électrode : tige de *tungstène* non fusible.

Protections : gaz *inerte*.

Nature du courant : alternatif ou continu.

Apport de métal : pas d'apport ou apport séparé.

Le soudage au plasma (SP) dérive du procédé TIG en ce qu'il met en œuvre une torche particulière qui a pour effet de transformer un arc TIG à ionisation dite libre en un arc *constricté* ou *rigide*, concentré sur son axe, très directif et peu sensible à la présence de la pièce.

■ Le principe est donné sur la figure 27 en comparaison avec le TIG classique.

La torche comporte une électrode supplémentaire formant un orifice calibré dont l'effet de paroi froide amène précisément la constriction de la colonne ionisée établie entre l'électrode de tungstène et la pièce. Cette disposition nécessite d'amener un gaz dit *plasmagène* qui s'écoule par l'orifice et dont le débit et la pression jouent un rôle primordial, ainsi que d'appliquer entre l'électrode et l'orifice un courant continu, d'intensité limitée, sous la forme d'un *arc pilote*.

Une fois l'arc pilote amorcé, la mise en marche de la torche et l'apparition de l'arc plasma proprement dit s'effectuent simplement par la fermeture du contacteur du générateur principal, de caractéristiques secondaires identiques à celle d'un générateur TIG normal.

L'ensemble reçoit en outre un flux gazeux de protection globale de la torche et du bain de fusion.

La constriction de la colonne ionisée a pour effet de réduire notablement ses dimensions transversales, ce qui accroît la densité de courant, augmente le taux et la tension d'ionisation donc la température (de 5 000 à 10 000 °C), et finalement la puissance spécifique à la pièce qui passe de 10^2 à 10^4 W/cm². L'augmentation importante de cette puissance a pour conséquence l'apparition sur la pièce d'un flux de chaleur capable d'y provoquer l'apparition de ce qu'il est convenu d'appeler un *trou de serrure* (*key hole*), traduisant le pouvoir pénétrant obtenu. C'est ce pouvoir qui est recherché dans les applications de soudage au plasma dans lesquelles il apporte un avantage par rapport au TIG car il donne lieu, pour ce qui est de la zone fondue, à un rapport largeur/pénétration accru (figure 28).

Une installation de soudage au plasma est donc similaire à celle de soudage TIG, à la buse plasmagène près, et s'utilise de manière identique.

■ Le plasma est essentiellement complémentaire du TIG et tout particulièrement dans deux domaines : le microsoudage et le soudage au plasma proprement dit.

● Microsoudage

Lorsque l'on désire utiliser le TIG dans des applications de soudage de faible puissance avec des courants de soudage de l'ordre de l'ampère, on se heurte à des problèmes de stabilité, voire d'impossibilité opératoire.

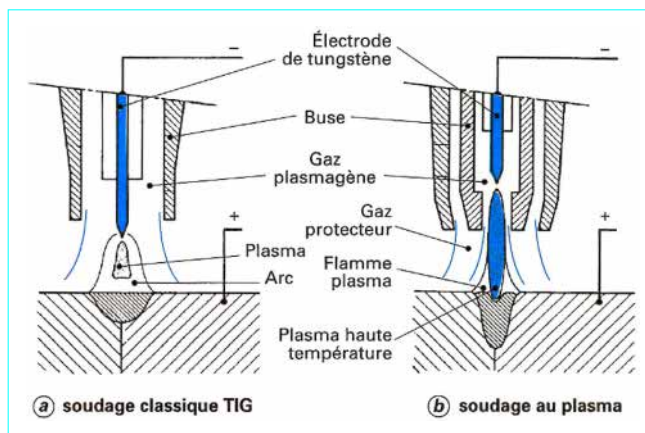


Figure 27 – Soudage au plasma : comparaison avec le soudage classique TIG

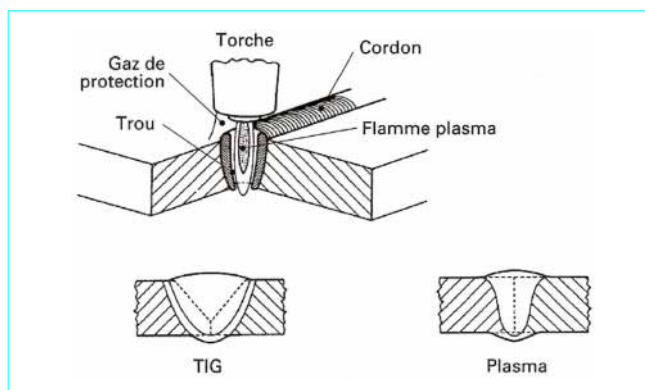


Figure 28 – Principe du trou de serrure

La rigidité du plasma pallie cette difficulté. On a pu ainsi réaliser des micro-assemblages en fusion simple sur la majorité des matériaux soudables par fusion, soit en bout, soit d'angle, sur des épaisseurs inférieures à 0,5 mm ou des tissus métalliques tressés (filtres).

● Soudage au plasma proprement dit

On s'est aperçu que pour des applications industrielles favorables à l'emploi du TIG, le plasma présentait un avantage pratique déterminant quant à la protection de l'électrode des vapeurs polluantes. Mais c'est surtout pour son effet de pénétration que le soudage au plasma est utilisé. Il permet de développer des soudures en une passe sur des épaisseurs moyennes et d'éviter la réalisation toujours coûteuse d'un chanfrein ; les intensités sont alors de 100 A et plus.

Ces applications se rencontrent dans les fabrications mettant en œuvre des métaux nobles, aciers inoxydables, alliages de titane, avec ou sans métal d'apport.

On peut faire fonctionner une torche plasma en courant alternatif et appliquer le procédé au soudage en bout d'alliages d'aluminium. L'emploi de générateurs à *polarité variable*, fournissant un courant alternatif à ondes carrées d'intensités et de durées différentes selon la polarité a ainsi permis de souder sans chanfrein des épaisseurs de 12 mm en une seule passe.

6.2 Soudage avec fil fourré

Caractères principaux :

Électrode : fil spécial fusible fourré.

Protection : gazeuse, active, due aux vapeurs du flux avec ou sans apport de gaz complémentaire.

Nature du courant : continu, caractéristiques horizontales.

Le soudage avec fil fourré (*flux cored arc welding*) s'apparente au soudage MAG dont il se distingue par la nature de l'électrode qu'il met en œuvre.

■ L'électrode (figure 29) se présente sous la forme d'un feuillard enroulé sur lui-même pour contenir un flux solide en vue d'obtenir des conditions de soudage physico-chimiques similaires à celles obtenues en soudage à l'électrode enrobée et une technologie similaire à celle du soudage MAG par la continuité de l'électrode, qui permet un emploi semi-automatique ou automatique.

Selon la composition du flux, le soudage avec fil fourré doit s'accompagner ou non d'une protection gazeuse supplémentaire. Lorsqu'il est utilisé sans gaz d'apport, sa mise en œuvre est donc aussi simple que celle du soudage manuel.

Employé automatiquement, on rejoint les avantages du soudage sous flux en poudre sans avoir les difficultés technologiques liées à la nature pulvérulente du flux, à son traitement et à son alimentation dans la zone d'arc.

Enfin, un non moindre intérêt réside dans l'éventail très large de qualités d'électrodes qu'il est possible d'élaborer et dans les avantages qui en résultent, du point de vue métallurgique, en comparaison avec le soudage MAG.

■ Il existe toute une gamme de **fils fourrés** se distinguant par leur provenance, leur technologie et la nature des matériaux employés. On obtient le fil fourré par enroulement d'un feuillard généralement en acier doux rempli de façon précise pendant son formage par le flux en poudre. L'ensemble est ensuite rétreint par tréfilage pour donner un fil rond dans lequel le flux est fermement retenu, traité thermiquement si besoin, puis rétreint à nouveau pour obtenir les différents diamètres d'utilisation. Le fil est enfin enroulé en bobines à la manière d'un fil plein classique. Les flux employés sont de même nature que ceux utilisés dans le soudage sous flux en poudre.

Le tableau 6 symbolise différentes dispositions adoptées pour la réalisation des fils dont le rapport métal/flux varie de 75 à 85 % en masse (45 à 75 % en volume). Pour ce qui concerne la nature et la composition du flux, il existe, selon le constructeur, de nombreuses

combinaisons ayant des effets plus ou moins prononcés, principalement en désoxydation, protection du bain en cours de solidification, stabilisation de l'arc, addition en éléments d'alliages, protection gazeuse.

Les conditions physiques de l'arc avec fil fourré donnent lieu à peu de projections de métal mais, en contrepartie, à un dégagement important de fumées. Lorsque les fils fourrés nécessitent une protection gazeuse complémentaire, celle-ci est généralement du dioxyde de carbone améliorant encore la pénétration.

■ L'équipement de soudage avec fil fourré est similaire à celui du soudage MAG. Le générateur est du type à courant continu, caractéristiques horizontales, et peut être utilisé sous l'une ou l'autre polarité selon la nature du fil. L'équipement comporte un dévidoir-entraîneur adapté à la nature du fil ; les galets entraîneurs, qui doivent correspondre avec précision à son diamètre, sont généralement finement striés afin d'obtenir un entraînement positif sans effort de pression élevé. La torche est soit un simple guide-fil avec poignée, soit une torche plus classique avec arrivée du gaz de protection.

■ **Caractéristiques** : les taux moyens de métal déposé sont donnés par les courbes de la figure 30. Les paramètres de l'opération de soudage dépendent de la composition du fil ; la tension d'arc, le courant, la vitesse de déplacement et la position de soudage ont leurs effets sur la forme du cordon, la vitesse de dépôt, la qualité et la compacité du résultat.

Le soudage avec fil fourré est utilisé en mono- et multipasses pour obtenir des productivités ou des qualités métallurgiques supérieures, lorsque cela s'impose, au soudage MAG dans le cas d'épaisseurs élevées et/ou des facilités de mise en œuvre par rapport au soudage sous flux.

Les matériaux soudables sont presque exclusivement les aciers au carbone alliés ou faiblement alliés.

■ Les **domaines d'emploi** sont par suite la construction métallique et la mécano-soudure légère ou moyenne.

6.3 Soudage des fortes épaisseurs

Du fait de sa faible puissance spécifique, la pénétration de l'arc dans les métaux en vue de leur soudage reste limitée. La technique du chanfrein en V ou en U et du soudage en passes multiples permet alors de réaliser des assemblages en tôles épaisses. Cependant, du fait de l'accroissement des besoins en tels assemblages, on a cherché de meilleures conditions d'exécution des soudures sous le double aspect de la productivité et de l'automatisme.

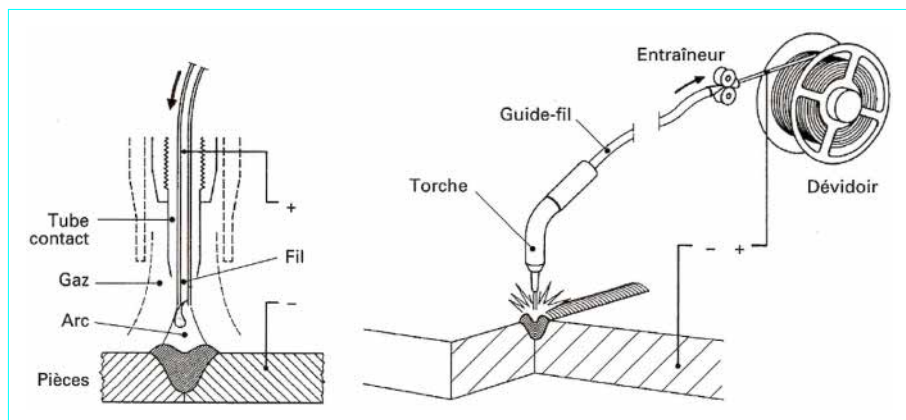


Figure 29 – Soudage avec fil fourré : principe

Tableau 6 – Différents types de fils fourrés

Section	Symbole	Section	Symbole
Tube		Feuillard plié	
Feuillard roulé en bout		Feuillard replié	
Feuillard à recouvrement		Feuillard enroulé	

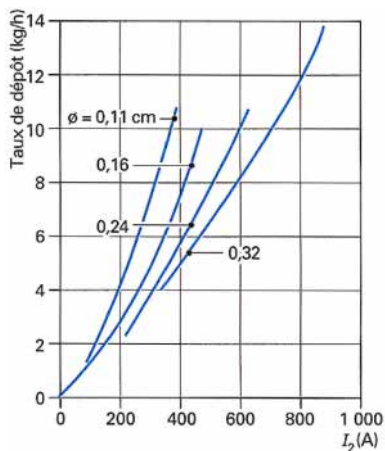


Figure 30 – Taux de métal déposé en fonction du courant d'arc et du diamètre du fil fourré (avec gaz protecteur)

Ces conditions ont été trouvées en supprimant le chanfrein et en disposant les tôles de façon à ménager entre elles avant souder un intervalle de largeur constante aussi étroite que possible (figure 31) avec pour conséquence :

- de **diminuer le volume de métal déposé** par rapport au chanfrein normalement prévu ;
- d'**obtenir des conditions de dépôt de métal répétitives**, en paramètres de soudage et en position relative des passes, et, par suite, aisément automatisables.

Cette démarche a prévalu dans deux techniques bien connues :

- le **soudage vertical sous laitier** ;
- le **soudage sous gaz en intervalle étroit**.

Elles permettent l'une et l'autre d'assembler les tôles les plus épaisses (jusqu'à 200 mm et plus) dans des conditions techniques et économiques meilleures que celles des procédés classiques. Elles sont **surtout employées dans la fabrication de grands réservoirs sous pression**.

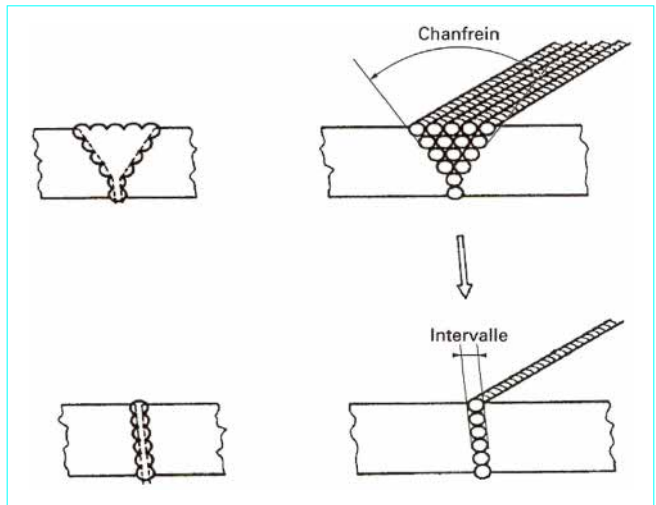


Figure 31 – Soudage en intervalle étroit ou sans chanfrein : principe

6.3.1 Soudage vertical sous laitier

Ce procédé, également appelé **électroslag**, est né à l'institut Paton de Kiev au début des années cinquante et s'est rapidement répandu en Europe et aux États-Unis. L'**électroslag** procède des mêmes principes que le soudage sous flux en poudre. La fusion du fil d'apport n'y est pas obtenue par un phénomène d'arc établi dans un milieu gazeux ionisé mais est due à l'effet Joule produit par le passage du courant dans le laitier maintenu en fusion au-dessus du bain (figure 32). C'est pourquoi on appelle ce procédé **soudage sous laitier électroconducteur**.

Caractères principaux :

Électrode : fil nu plein ou composite (guide-fil fusible).

Protection : laitier dû au flux porté à fusion.

Nature du courant : continu ou alternatif, caractéristiques horizontales.

Le procédé se conduit verticalement de bas en haut pour des questions évidentes de gravité. Le bain liquide de métal en fusion et le laitier qui le recouvre sont maintenus de part et d'autre du joint par des sabots en cuivre refroidis.

Le soudage vertical sous laitier implique un appareillage approprié constitué essentiellement par :

- un ensemble de soudage (figure 32) comportant l'amenée de fil d'apport, les sabots et leur support, et le mécanisme de déplacement ;
- un générateur similaire à ceux employés en soudage sous flux.

La soudure débute sur un talon préalablement soudé à la partie inférieure. Le phénomène est démarré par l'amorçage d'un arc qui, au bout d'un certain temps, laisse place à un état permanent de conduction pure au travers du flux en fusion devenu laitier. Une couche de métal en fusion remplit la cavité fermée par les sabots. Par l'apport de métal, le niveau s'élève tandis que le laitier moins dense se maintient au-dessus en formant un écran protecteur vis-à-vis de l'air ambiant. L'ensemble de soudage, par l'action du mécanisme de déplacement, est réglé de façon synchrone avec le remplissage. Au fur et à mesure de la progression vers le haut, le métal se refroidit en formant la soudure, la puissance thermique du procédé ayant donné lieu à une importante dilution. Les paramètres restent constants tout le long du joint et la soudure s'exécute en une seule passe.

Ce principe de base s'extrapole aux fortes épaisseurs de plusieurs façons (figure 33) : oscillation de l'amenée de fil ou mise en œuvre de plusieurs amenées de fil en parallèle. De plus, on a simplifié l'équipement en supprimant le mécanisme de déplacement de la tête par la mise en œuvre de guides-fils fusibles qui sont fixés à la partie supérieure et sont donc consommés au fur et à mesure de l'évolution de la soudure.

■ Matériaux d'apport

Ce sont essentiellement l'électrode, le guide-fil, s'il est consommable, et le flux.

● Électrode

En fil plein, le matériau de l'électrode est élaboré en fonction du métal de base des pièces à souder. En fil fourré, elle permet d'amener des éléments d'addition complémentaires (§ 3).

● Guides-fils fusibles

Ils sont réalisés en matériaux compatibles avec les caractéristiques du métal déposé. Lorsqu'ils sont de grande longueur (et afin d'éviter les faux contacts fortuits), ils sont isolés par un enrobage minéral.

● Flux

Les flux diffèrent selon le fournisseur ; ils sont sélectionnés en fonction de certaines caractéristiques :

- conductivité électrique adéquate. Des flux trop ou trop peu résistants peuvent amener des difficultés de soudage ;
- viscosité moyenne, pour lui éviter de couler hors du bain et lui donner les qualités de protection recherchées ;
- compatibilité métallurgique avec le métal déposé.

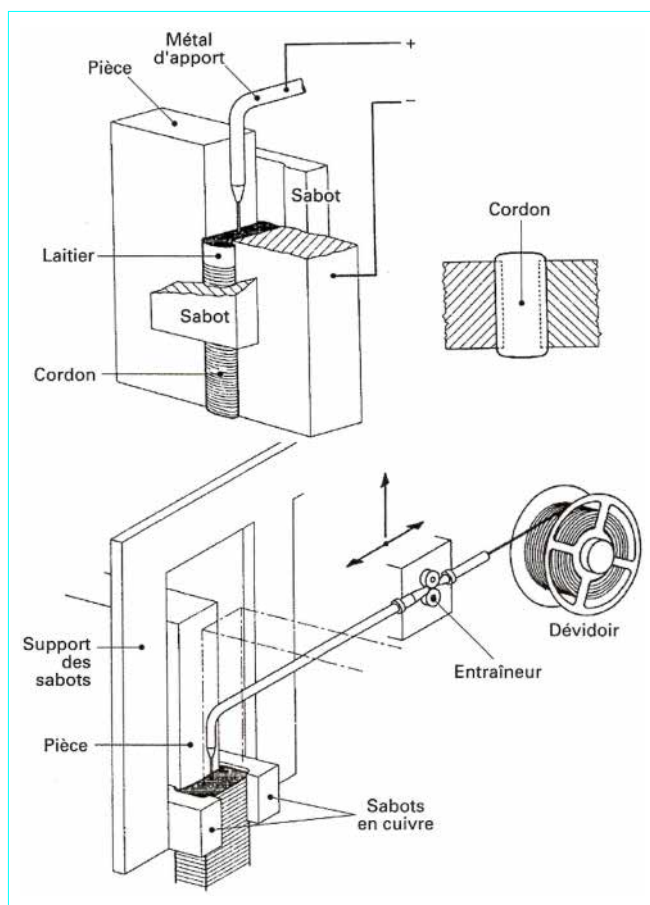


Figure 32 – Soudage vertical sous laitier : principe

On retrouve généralement des compositions similaires à celles des flux de soudage classique.

■ Application

Un assemblage type sous laitier est celui de la soudure d'une génératrice de virole (figure 34) réalisée en tôle d'épaisseur généralement supérieure à 25 mm, niveau à partir duquel ce procédé devient avantageux par rapport au soudage sous flux, sous le double aspect du temps de réalisation et du contrôle des distorsions. La figure 34 indique la différence des sections des cordons obtenue selon les deux techniques. La figure 35 présente d'autres possibilités d'assemblage.

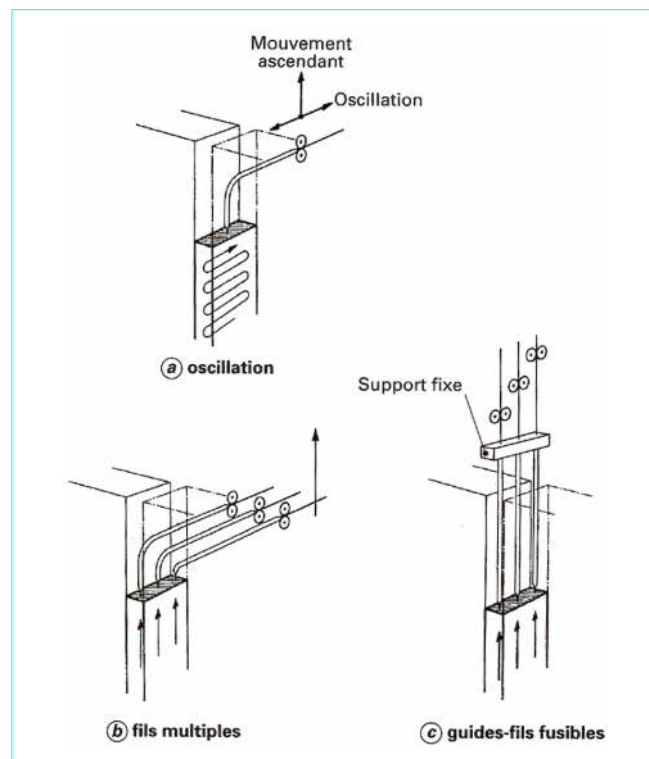


Figure 33 – Variantes de soudage vertical sous laitier

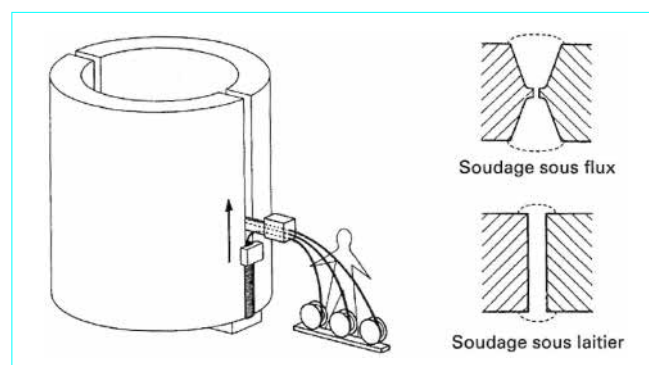


Figure 34 – Soudage vertical sous laitier : application sur une virole

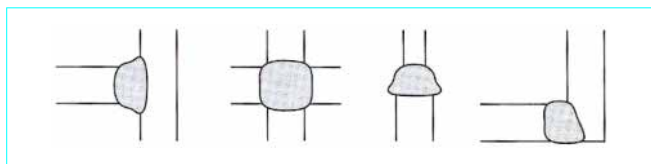


Figure 35 – Possibilités d'assemblage par soudage vertical sous laitier

Le tableau 7 donne quelques indications paramétriques.

Le taux de déposition est de 25 à 50 % supérieur à celui du soudage sous flux.

Ce procédé est surtout avantageux lors de soudures longues et simples par rapport à des assemblages nécessitant des cordons courts et variés. Le gain de temps sur une soudure typique peut être divisé par 5 à 10 selon le cas.

6.3.2 Soudage sous gaz en intervalle étroit

Appelé *narrow gap process* dans les pays anglo-saxons, le soudage en intervalle étroit dérive quant à lui du soudage MAG.

Il est né aux États-Unis du besoin d'automatiser complètement le soudage de pipe-lines de grands diamètres (1 m) et d'épaisseurs élevées (12 à 25 mm), ne pouvant s'exécuter que de façon orbitale, axe horizontal, pour toutes positions (§ 1). La recherche d'un bain de petites dimensions pouvant se maintenir au plafond et d'un temps opératoire le plus court possible a tout d'abord donné lieu à une technique appelée *open arc* qui n'a connu aucune application autre qu'expérimentale, mais dont l'extrapolation a donné naissance au *narrow gap*.

Différentes technologies ont été élaborées à partir du principe de base représenté sur la figure 36, qui met en œuvre deux torches MAG associées, équipées chacune d'un système de cambrage préalable du fil électrode, de manière à lui donner une orientation naturelle à sa sortie du tube contact et à obtenir une bonne liaison cordon/paroi.

Caractères principaux :

Électrode : fil fusible de forme particulière selon la variante.

Protection : gazeuse (argon + CO₂).

Nature du courant : continu (pulsé), caractéristiques horizontales.

On recherche un transfert de métal par pulvérisation qui offre des conditions de soudage satisfaisantes quant à la dilution, à l'énergie par unité de longueur, aux dimensions du bain de métal en fusion et au taux de projections pratiquement nul.

La soudure se conduit en passes successives. La première d'entre elles s'exécute avec un talon qui peut être pratiqué par usinage ou être constitué par une latte rapportée et soudée préalablement.

Particulièrement appropriés au soudage orbital, ces procédés peuvent également être exploités de façon conventionnelle, c'est-à-dire à plat et en corniche. Dans ce cas, on peut s'écarter des conditions du soudage orbital et travailler avec des puissances supérieures. Le procédé, comparé aux procédés classiques MAG ou sous flux, présente des avantages du double point de vue des caractéristiques de la liaison et de la rapidité d'exécution.

En effet, grâce à la possibilité de concevoir des torches très étroites et au système de cambrage préalable du fil, l'écartement type des bords est de 9 mm et donne par suite un volume de métal déposé très réduit (figure 36).

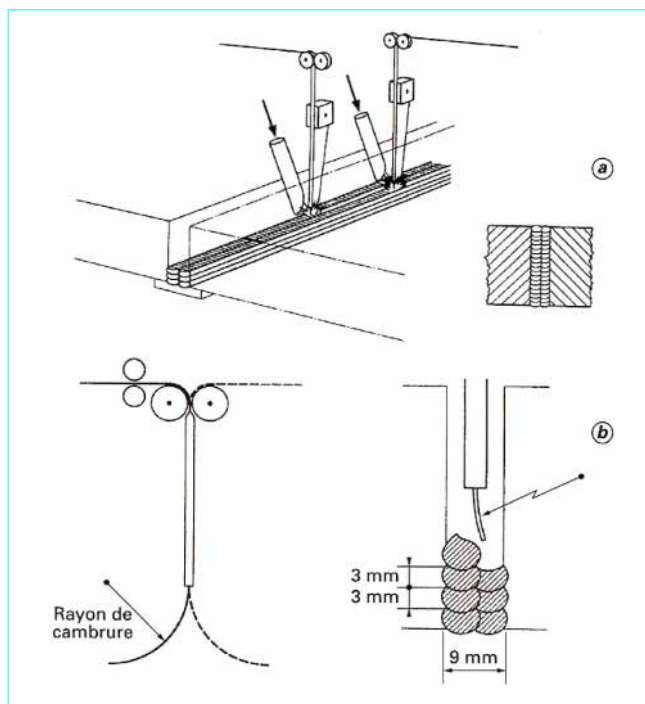


Figure 36 – Soudage sous gaz en intervalle étroit à deux fils cambrés

Tableau 7 – Indications paramétriques pour la soudure d'une génératrice de virole par soudage vertical sous laitier

Épaisseur des pièces (mm)	Écartement des pièces (mm)	Nombre de fils	Courant d'arc (A)	Tension d'arc (V)	Oscillation
25	25	1	600	40	non
50	30	1	750	45	non
100	30	2	1 500	50	non
200	30	2	1 500	50	oui
300	30	2	1 500	50	oui

Cet écartement type peut varier selon l'une ou l'autre des différentes techniques (figure 37) qui ont été développées dans divers pays :

- technique à un fil nu non guidé (développée en URSS et peu utilisée) ;
- technique à un fil ondulé (Japon) ;
- technique à un fil cambré et une torche oscillante (Japon) ;
- technique à deux fils torsadés (Japon) ;
- technique à deux fils précambrés indépendants (États-Unis, France) ;
- technique à trois ou quatre fils (États-Unis, France).

Toutes ces techniques nécessitent un appareillage approprié : torches de sections réduites, formation du cambrage, de l'ondulation, de l'oscillation du fil, ainsi que des systèmes de guidage précis qui garantissent :

- la qualité de la liaison grâce à la bonne position des dépôts successifs par rapport aux précédents et par rapport aux parois ;
- l'automatisme de l'opération, les réglages restant identiques à eux-mêmes.

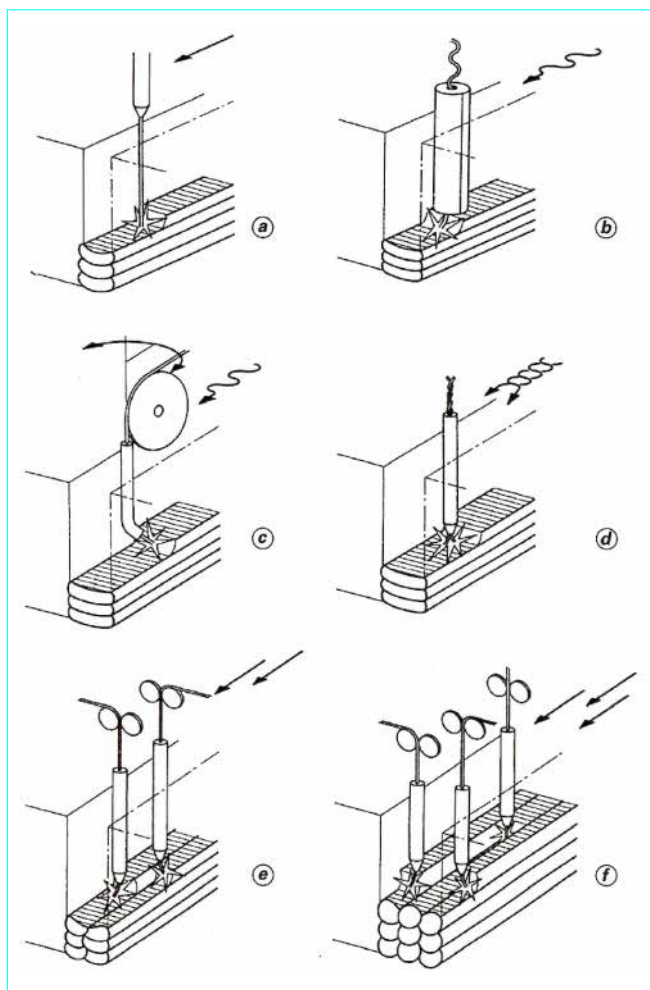


Figure 37 - Variantes de soudage en intervalle étroit

Les systèmes de guidage agissant transversalement et en hauteur sont réglés une fois pour toutes et font partie intégrante du procédé.

Les paramètres, propres à chaque variante, restent les mêmes ou presque quelles que soient les applications :

- écartement des tôles (8 à 12 mm) ;
- courant et tension d'arc (300 A et 25 V) ;
- diamètre de fil (1 à 1,2 mm) ;
- composition de gaz (argon + CO₂) ;
- réglage de l'arrivée du ou des fils ;
- vitesse de déplacement (environ 1 m/min).

Le soudage en intervalle étroit est utilisé en construction lourde des réservoirs sous pression. Les épaisseurs visées sont de 50 mm à plus de 200 mm.

6.4 Soudage à l'arc tournant

Ce procédé de soudage est original en ce qu'il ne dérive d'aucun autre procédé de soudage à l'arc classique ; il s'en distingue en outre par son effet global par rapport à l'effet progressif du soudage par cordon.

L'objet principal du soudage à l'arc tournant est de fournir un moyen de soudage bout à bout de sections tubulaires avec un certain nombre d'avantages par rapport au soudage par étincelage (article Soudage par résistance [B 7 720] dans ce traité).

Le procédé et son principe sont représentés sur la figure 38. Un arc est amorcé entre deux tubes à souder bout à bout, placés en regard, sur une machine appropriée, à une distance de l'ordre du millimètre et connectés chacun à l'une des polarités d'un générateur de soudage à l'arc classique MAG. La présence de deux bobines d'excitation parcourues par le courant d'arc fait apparaître dans l'interface un champ magnétique transversal sous l'action duquel l'arc se déplace. Les pôles cathodique et anodique formés localement sur les tubes et portés à la température souhaitée se déplacent également avec l'arc sur tout le pourtour. L'arc se met à tourner à grande vitesse et ses pôles forment par suite deux sources de chaleur portant les extrémités des tubes à la température de forgeage (maintien) où l'une des pièces est appliquée sur l'autre pour obtenir leur liaison.

Le procédé se caractérise par sa rapidité et présente, par rapport au soudage par friction et au soudage par étincelage, des avantages déterminants :

- pièces fixes pendant la chauffe ;
- faible puissance (10 à 12 kW) ;
- sections circulaires ou s'y ramenant ;
- absence de projections métalliques.

Les applications du procédé se rencontrent dans les fabrications de série telles que des essieux arrière de voitures automobiles, par exemple.

6.5 Soudage des goujons (procédé Nelson)

Le soudage de goujons sur plaque est un besoin industriel fréquent soit en usine, soit sur site. Il peut impliquer des goujons lisses ou filetés suivant le cas. Compte tenu de sa particularité, il a été, à l'origine, limité d'emploi par la difficulté de lui appliquer les procédés de soudage par résistance classiques (puissance électrique et mécanique des machines) ou de soudage à l'arc (complication due à la rotation de l'électrode). Des machines à souder par friction ont également été envisagées mais sans succès.

Le problème a été résolu par un constructeur américain qui a développé un système très spécial dérivé du soudage à l'arc. Il met en œuvre une source de chaleur provenant d'un arc électrique tout à fait classique mais établi, grâce à un pistolet approprié, entre le goujon et la plaque (figure 39). La protection est du type minéral et se présente sous la forme d'un anneau, ou *férule*, placé autour du goujon et se comportant comme un enrobage de baguette de soudage manuel. L'arc est amorcé par contact, le pistolet comportant une pince mobile appuyant au départ le goujon contre la plaque. Le passage du courant agit magnétiquement sur la pince mobile qui se rétracte rapidement donnant naissance à un arc provoquant l'échauffement des électrodes sous protection des vapeurs de l'enrobage se dégageant alors spontanément. Au bout d'une temporisation nécessaire à l'obtention d'une température suffisante aux électrodes, le courant est interrompu et la pince appuie de nouveau le goujon sur la plaque qui se soude alors naturellement sur toute la section.

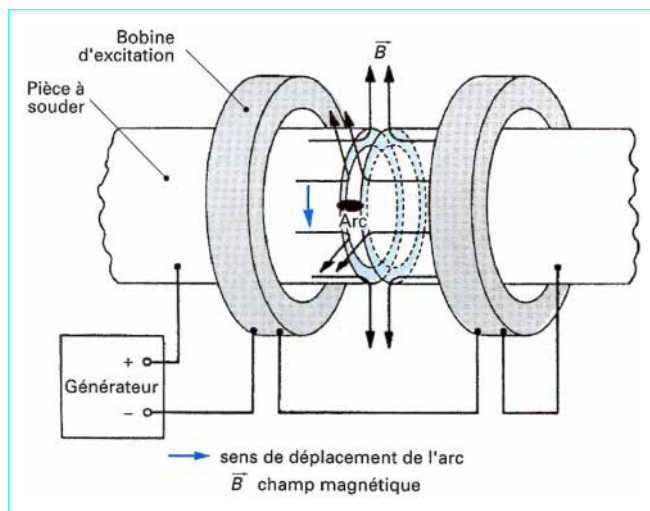


Figure 38 – Soudage à l'arc tournant : principe

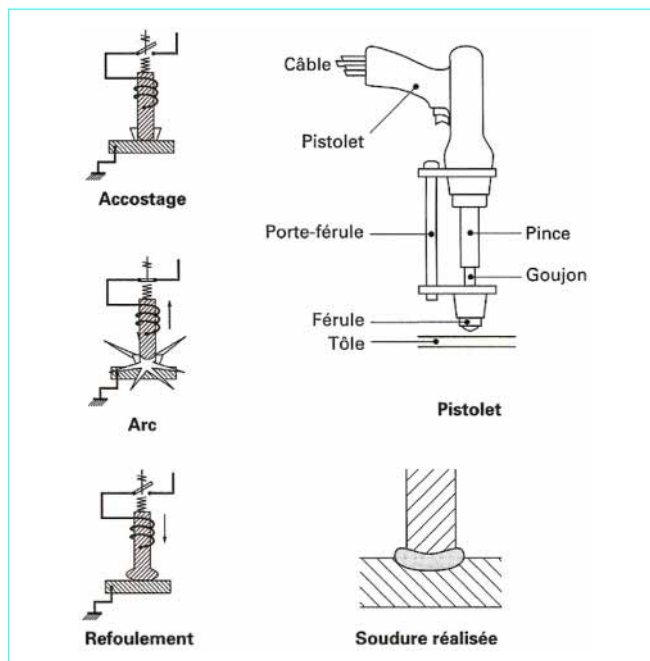


Figure 39 – Soudage des goujons : principe

7. Mise en œuvre du soudage à l'arc

7.1 Équipement de base

Les procédés de soudage à l'arc mettent en œuvre un équipement de base typique dont les principaux éléments sont schématisés dans les différentes figures de principe de chaque procédé. Les éléments essentiels sont les suivants.

■ Un outil généralement dénommé **torche** (torche manuelle, torche MAG, torche TIG, etc.) est très spécifique du procédé pour ce qui est de la nature de l'électrode (baguette, fil continu, tige de tungstène) et de la protection (flux, gaz).

Pour les puissances élevées, la torche doit être refroidie par circulation d'eau.

Il existe des versions manuelles incorporées dans une poignée et munies du contacteur à distance de la commande du soudage et des versions automatiques sous forme de barreau (figure 40).

■ Un générateur, également appelé **source de courant de soudage à l'arc**, est caractérisé essentiellement par :

- le ou les types de courants délivrés : alternatif ou continu, lisse ou pulsé ;
- le courant secondaire nominal, qui doit correspondre à la nature des travaux à exécuter, déterminés par le taux de dépôt à assurer ou le volume du cordon en rapport avec le diamètre de l'électrode ; la valeur du courant nominal est complétée par l'intensité que le générateur doit pouvoir supporter sans échauffement au facteur de marche 60 % ou 100 % ;
- la tension à vide ou tension d'amorçage ;
- la nature de la caractéristique secondaire : tombante, verticale ou plate (tableau 8).

L'étendue des différentes gammes de courant, les moyens de réglage et leur intégration (ou non) dans un poste fixe ou mobile, d'atelier ou de chantier, etc. sont d'autres caractéristiques à définir.

La gamme des courants s'étend de quelques dizaines d'ampères à quelques 600 A.

Excepté quelques générateurs de chantier qui sont tournants et entraînés par des moteurs thermiques, tous les générateurs sont aujourd'hui statiques à transformateurs/redresseurs et souvent transistorisés.

■ Selon le cas, il existe :

- un **entraîneur de fil**, généralement à deux galets adaptés au diamètre (figure 41) ;
- une **alimentation en flux** par une trémie ;
- une **alimentation en gaz**, délivrée à 200 bar à partir de bouteilles ou d'une centrale, puis détendu.

L'équipement peut s'exploiter manuellement, dans un ensemble mécanisé ou dans une machine automatique selon l'application et si le procédé le permet (§ 7.3). Des composants auxiliaires peuvent être pris en considération. Ils visent la plupart du temps à doter les équipements de dispositifs rendant leur utilisation plus simple et de toute sécurité.

7.2 Préparation des pièces

■ **Préparation géométrique (chanfreins)**

Une fois choisis la méthode et le procédé de soudage, connaissant les matériaux, les épaisseurs et le type de joint (bord à bord, d'angle, à clin, en T, etc.), la préparation des bords se définit soit en référence aux normes lorsqu'elles existent (NF EN 29692, NF A 89-310), soit par extrapolation ou après essais. On dispose alors, en particulier, des dimensions des chanfreins, ce qui permet de définir les moyens à installer pour les réaliser. Les opérations mécaniques précédant le soudage, qu'elles appartiennent au processus normal d'élaboration des pièces ou qu'elles soient prévues spécifiquement en vue du soudage, doivent tenir compte des tolérances géométriques admissibles par le procédé retenu.

■ **Préparation des surfaces et mise en position**

Les parties qui seront fondues au cours du soudage doivent être propres et, en particulier, être exemptes d'oxydes, de graisses, de dépôts étrangers, de peinture, etc. pouvant être à l'origine de défauts dans le cordon. Des opérations de dégraissage, sablage, meulage, etc. sont à prévoir et peuvent prendre une réelle importance dans le bilan économique de l'assemblage.

Selon la méthode choisie et le type d'assemblage à réaliser, il y a lieu de définir les moyens de positionnement des pièces et les moyens de leur maintien pendant le soudage. En effet, la qualité résultante découle :

- de conditions de positionnement relatif aussi rigoureuses que possible, définies en fonction des caractéristiques du cordon et de ses possibilités de prendre en compte les écarts géométriques existants ;

- de moyens mis en œuvre afin de contenir les efforts se développant en soudage et conduisant, par dilatation, à des déformations pouvant gêner le développement de la liaison.

Les différents moyens (figure 42) sont un pointage préalable des pièces, un présoudage de pièces de maintien éliminées par la suite, ou des outillages de serrage. Ils sont définis au cas par cas et dépendent de la nature même de l'assemblage et des conditions de production.

7.3 Différents modes d'utilisation

Ces différents modes se résument à trois possibilités : utilisation manuelle, mécanisée ou automatique.

■ Utilisation manuelle

Elle nécessite un équipement de base, un soudeur qualifié, des éléments d'aide, des outillages, etc.

L'utilisation manuelle est caractérisée par le fait que le *soudeur conduit l'opération de fusion et guide la torche le long du joint*. Il doit donc avoir reçu une formation comportant un entraînement à la tenue de la torche et à la conduite de l'opération dans toutes les situations qu'il pourra rencontrer, ainsi qu'une approche théorique sur le ou les procédés, dont il aura la spécialité, et sur les paramètres dont il aura à se servir pour ajuster les conditions de soudage (NF A 88-111).

Selon le poids, le volume des pièces, les positions, etc., le poste de travail doit comporter des dispositifs appropriés de manutention et de manipulation (figure 43a).

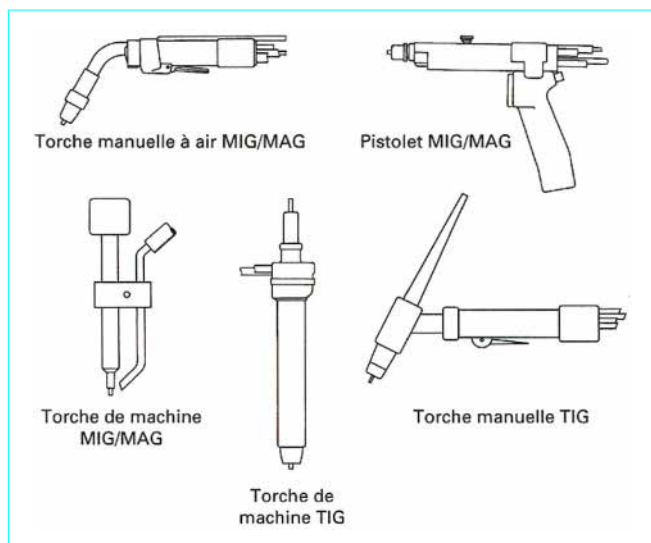


Figure 40 – Exemples de torches de soudage

Tableau 8 – Caractéristiques des générateurs et des courants en soudage à l'arc			
Caractéristique (§ 1.1)	Courant		
	alternatif	continu	pulsé
tombante	Électrode enrobée TIG Plasma	Électrode enrobée TIG Plasma	TIG Plasma
intermédiaire	Électrode enrobée Flux	Électrode enrobée Flux	
horizontale	Flux	MIG/MAG Flux	MIG/MAG

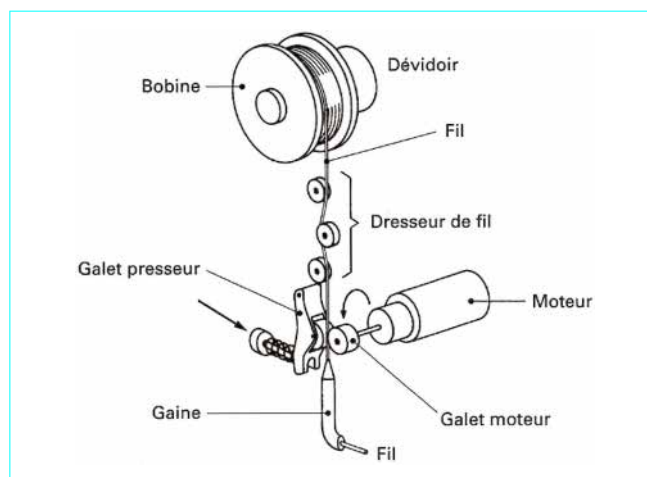


Figure 41 – Entraînement du fil : principe

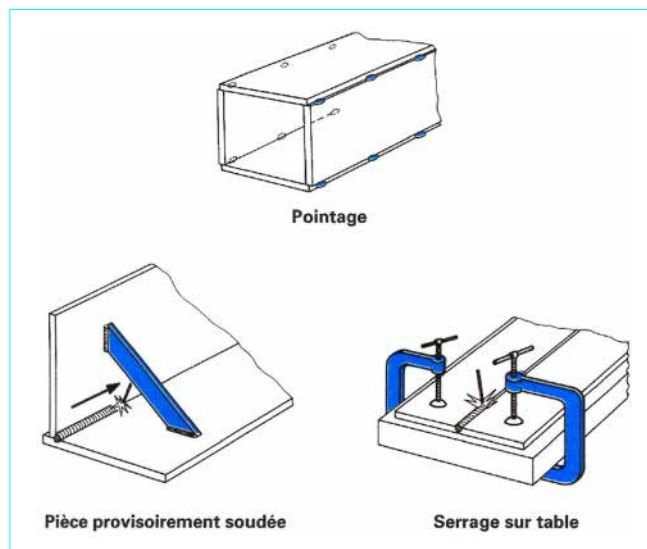


Figure 42 – Maintien des pièces : principe

■ Utilisation mécanisée

Le soudeur ne tient plus la torche, qui est alors guidée le long du joint par *le dispositif de mécanisation*. Celui-ci est, dans ce but, doté d'une commande de déplacement à la vitesse de soudage voulue.

Une installation typique mécanisée est schématisée sur la figure 43b, avec une *potence* qui reçoit la tête de soudage et un *vireur* sur lequel repose la pièce (dans ce cas un cylindre) et l'entraîne en rotation.

Le soudeur reste responsable du soudage en agissant si besoin est sur la position de la torche et sur les paramètres.

■ Utilisation automatique

Hormis le soudage à l'électrode enrobée, tous les autres procédés sont susceptibles d'être mis en œuvre de façon entièrement automatique, c'est-à-dire au moyen d'une machine qui assure toutes les fonctions du soudeur. Les paramètres prédéterminés sont affichés et commandés en conséquence et ne sont plus sous la responsabilité du préposé qui peut être un soudeur, mais également un simple opérateur appelé *opérateur-soudeur* n'ayant pour rôle que la mise en place des pièces et leur enlèvement.

Il existe essentiellement deux formes d'automatisme : une *forme universelle*, avec un robot de soudage, ou une *forme spécifique* à un *assemblage particulier* à réaliser en grande série.

Dans le cas le plus général, l'automatisme doit prendre en compte chacun des paramètres selon une séquence et des valeurs prédéterminées ou adaptées.

L'élément de base d'un véritable automatisme de soudage à l'arc est le *suivi du joint*, la bonne position du cordon par rapport au joint étant la toute première condition à remplir dans la recherche de la qualité (cf. article *Soudage automatique* [BM 7 750] dans ce traité).

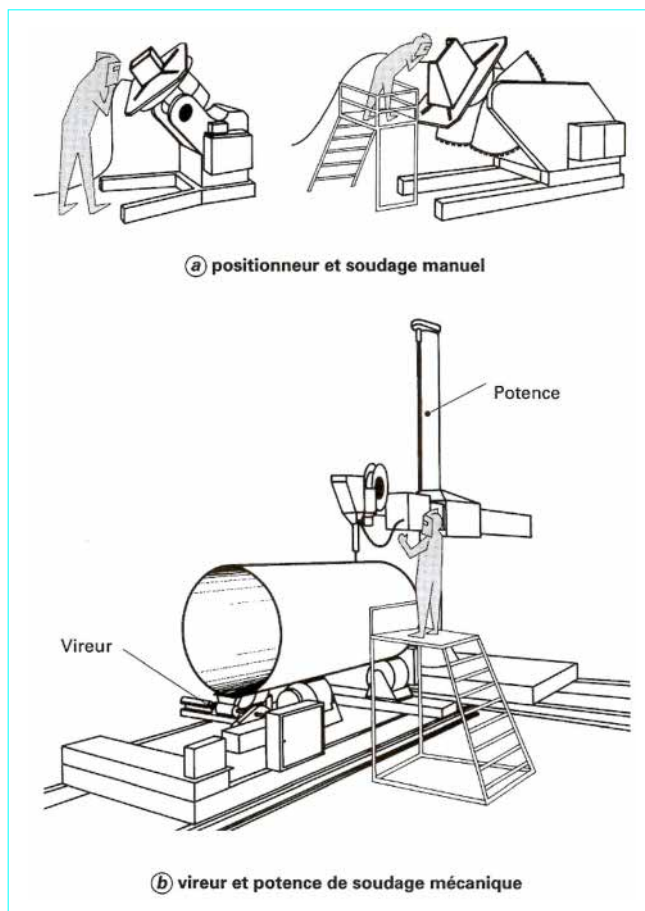


Figure 43 – Exemples de mécanisation