

Montage des pièces pour soudage à l'arc électrique

par **Alain CHABENAT**

*Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et Aérotechnique de Poitiers et de l'École Supérieure de Soudure et ses Applications (ESSA)
Responsable de la Section Ingénierie du soudage au Centre Technique de Framatome*

1. Généralités	BM 7 610 - 2
1.1 Accostage.....	— 2
1.2 Maintien des pièces pendant soudage.....	— 2
1.3 Mise en mouvement.....	— 2
2. Préparation et accostage	— 2
2.1 Déformations provoquées par le soudage.....	— 2
2.2 Outillages d'accostage et de bridage.....	— 4
2.2.1 Les différents rôles des outillages.....	— 4
2.2.2 Raboutage de tôles fines.....	— 4
2.2.3 Raboutage de tôles moyennes et épaisses.....	— 5
2.2.4 Soudures circulaires des tubes.....	— 6
2.2.5 Viroles.....	— 7
3. Mise en mouvement en soudage automatique	— 7
3.1 Principe.....	— 7
3.2 Mouvements rectilignes.....	— 8
3.2.1 Chariots sur rails.....	— 8
3.2.2 Poutres de soudage.....	— 8
3.3 Grandes soudures circulaires.....	— 9
3.3.1 Association potences-vireurs.....	— 9
3.3.2 Positionneurs.....	— 9
3.4 Autres soudures circulaires.....	— 9
3.4.1 Tours de soudage.....	— 9
3.4.2 Machines orbitales.....	— 10
3.5 Mouvements complexes.....	— 10
Pour en savoir plus	Doc. BM 7 610

Souder deux éléments métalliques, pour constituer un ensemble continu, implique :

- d'accoster ces deux parties, c'est-à-dire les mettre en face l'une de l'autre ;
- de les maintenir proches pendant l'opération de soudage, du moins au début ;
- de mettre en mouvement relatif la pièce et la torche de soudage lorsque l'on soude en mode automatique et parfois de mettre en mouvement la pièce lorsqu'un soudeur tient lui-même la torche.

Nous nous intéressons ici aux procédés de soudage à l'arc électrique ; les procédés faisceaux d'électrons, laser, résistance électrique, friction, etc., ne seront pas traités.

Le montage des pièces à souder sera abordé selon les deux aspects suivants :

— **préparation en atelier des pièces à souder**, en ce qui concerne l'accostage des bords, les moyens de maintien des pièces pendant le soudage, et le bridage vis-à-vis des déformations ;

— **description des machines et outillages de mise en mouvement des pièces et des torches de soudage**, en vue d'une automatisation de l'opération (chariots sur poutres ou positionneurs, vireurs, potences, tours, rails, etc.).

Nota : Le lecteur trouvera une description détaillée du procédé dans l'article [B 7 730] *Soudage à l'arc*.

1. Généralités

Souder deux éléments métalliques pour constituer un ensemble continu implique, comme dit dans l'introduction, la réalisation des opérations qui suivent.

1.1 Accostage

La mise en place face à face des deux parties à assembler se fait avant de souder et avant de pointer (agrafer). Il faut pour cela des outillages.

L'espace entre les pièces (« jeu » ou « écartement »), l'alignement de ces pièces, la géométrie de l'accostage en général sont définis avec une certaine tolérance. Celle-ci doit être respectée avant et pendant soudage. Cette **tolérance** est fonction du procédé de soudage retenu. Par exemple les tolérances d'accostage sont plus serrées en soudage TIG automatique qu'en soudage à l'arc submergé. Elle dépend également du mode de soudage (automatique ou manuel). En effet, un soudeur manuel adapte sa torche ou son électrode enrobée en position, inclinaison ; il effectue de petits mouvements tels qu'un léger balayage par exemple ; face aux imperfections de la préparation, aux variations de l'écartement des bords, etc., le soudeur adapte en permanence ses gestes, c'est ce qui fait sa dextérité et marque son expérience. Par contre, en soudage automatique, l'accostage doit être rigoureusement respecté et maintenu constant (à moins d'utiliser des moyens de correction efficaces ou des capteurs avec boucle de retour et systèmes « intelligents » du type autoadaptativité).

Les **outillages d'accostage** dépendront donc du mode de soudage (automatique ou manuel) et du procédé retenu.

On note aussi que, lorsque cela est possible (géométrie, approvisionnement des matériaux, possibilités d'usinage ou meulage, coût global, délais, habitudes et moyens, etc.), on peut limiter les outillages d'accostage en prévoyant une géométrie de chanfrein (préparation) comportant un emboîtement ou une latte usinée ou rapportée.

1.2 Maintien des pièces pendant soudage

Le soudage à l'arc apporte une quantité de chaleur élevée et concentrée, c'est-à-dire localisée. Ces deux facteurs, température et hétérogénéité, font que des contraintes se créent pendant l'opération de soudage autour de la soudure, et provoquent ainsi des déplacements à plus longue distance dans la pièce (dits « **déformations de soudage** » ou « **retraits** »).

Les forces ainsi engendrées sont très élevées.

Il est donc nécessaire, quoique pas toujours efficace, de limiter ces déformations de façon à faire en sorte que :

- d'une part, l'accostage reste à l'intérieur des tolérances, en particulier lors des passes de fond ou même de pointage ;
- d'autre part, de limiter l'effet de ces forces à longue distance, c'est-à-dire de contrôler les déformations globales de la pièce ou de la structure.

On parle alors d'**outillage de bridage**.

1.3 Mise en mouvement

■ Le soudage automatique consiste à assurer le mouvement relatif entre la torche de soudage et la pièce à souder. Là encore une certaine tolérance est exigée concernant les positions (position relative, trajectoire), les vitesses, la fiabilité (régularité, absence de vibrations, etc.).

Plusieurs **combinaisons** sont possibles.

● Pièce fixe et torche mobile.

■ **Exemple** : soudures longitudinales de viroles, soudures de caissons ou de raidisseurs sur panneaux, soudures orbitales en tuyauterie.

● Torche fixe et pièce mobile.

■ **Exemple** : soudures circulaires de viroles ou de pièces cylindriques en position *plat*, soudures longitudinales de tubes en continu.

● Pièce et torche en mouvement.

■ **Exemple** : soudure robotisée en « 3D » de pièces montées sur positionneur, table tournante.

■ Pour ces diverses configurations, on trouve des **matériels** souvent standards tels que poutres, potences, portiques, vireurs, positionneurs, tables tournantes, têtes sur rails, têtes orbitales, chariots, pinces pour tubes, robots cartésiens ou polaires et, bien sûr, les machines spéciales (dédiées).

2. Préparation et accostage

2.1 Déformations provoquées par le soudage

Avant de décrire les moyens généralement mis en œuvre pour la préparation et l'accostage des pièces avant soudage, nous évoquerons les phénomènes qui justifient ces moyens et en donnent l'importance.

■ Quelles sont les **origines des déformations** produites par une opération de soudage ?

L'arc électrique de soudage doit provoquer la fusion des bords à souder et celle du métal d'apport lorsqu'il y en a. Il engendre donc un champ de températures élevées et localisées. Ces deux facteurs cumulés génèrent à leur tour un champ de contraintes dès l'apparition de la source de chaleur.

Les contraintes d'**origine thermique** sont très élevées. Dans le cas du soudage, elles dépassent largement la limite d'élasticité du matériau soudé.

On peut estimer de façon simple les sollicitations thermomécaniques mises en jeu en soudage en imaginant, dans une plaque épaisse rigide, une zone chauffée localement à une température T , le reste de la pièce conservant la température ambiante.

Exemple : choisissons une élévation locale ΔT de 100 °C dans un acier ferritique dont le coefficient de dilatation linéique α vaut $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. La déformation « bloquée » par la partie rigide est :

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T = 1,2 \cdot 10^{-3}$$

Le module d'Young E restant voisin de 200 000 MPa sous ces « basses » températures, on voit que cet écart local faible de 100 °C provoque une contrainte de compression :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 240 \text{ MPa}$$

c'est-à-dire que si la zone chauffée est un barreau imaginaire de 1 cm² de section au milieu d'une masse importante, ce barreau tire sur la pièce avec une force de 2,4 t.

Cet exemple simple (simpliste) montre que l'opération de soudage génère des contraintes locales élevées, lesquelles conduisent à des **plastifications locales**, et engendrent de ce fait, des forces importantes dans la pièce elle-même.

Ces forces apparaissent dès que l'arc est formé, donc dès le pointage.

Pendant le soudage, le sens des contraintes et des déformations varie. Lorsque le soudage est terminé, l'effet que l'on vient de décrire s'inverse : après plastification, le refroidissement va s'accompagner d'une **contraction de la zone soudée**, et, globalement, le cordon de soudure va venir comprimer la pièce restée « froide », lui-même étant le siège de fortes tensions.

■ Il est commode et usuel de décomposer les effets de ces contraintes et de ces forces en plusieurs **composantes**, en regardant la géométrie prise par la pièce de part et d'autre du cordon de soudure, de la façon suivante.

● Retrait longitudinal

Il correspond à un raccourcissement du cordon et du métal proche, dans le sens de la longueur du joint ; la pièce se trouve ainsi comprimée.

Les tôles minces se retrouvent non planes sous l'effet d'un véritable flambement (figure 1 a).

De même, les viroles et tubes voient leur diamètre resserré : effet « diabolique » (figure 1 b), et cela de façon plus ou moins régulière (ovalisations).

Le rôle d'un outillage sera de limiter l'effet de ces retraits dans le cas de tôles ou plaques fines ou moyennes (quelques dixièmes de millimètres voire quelques millimètres) : on limitera les gauchissements. Par contre, on n'évitera jamais l'effet « diabolique ».

● Retrait transversal

Il correspond à une diminution des cotes dans la direction perpendiculaire au cordon de soudure (figure 2 a). Ce type de retrait est quasiment impossible à contrecarrer.

On utilisera, par contre, impérativement un outillage de maintien pour le rabotage de tôles fines ; son rôle est de plaquer fermement sur un plan (règle, latte...) les bords à assembler et d'empêcher que le retrait transversal ne conduise à voir les tôles se chevaucher à

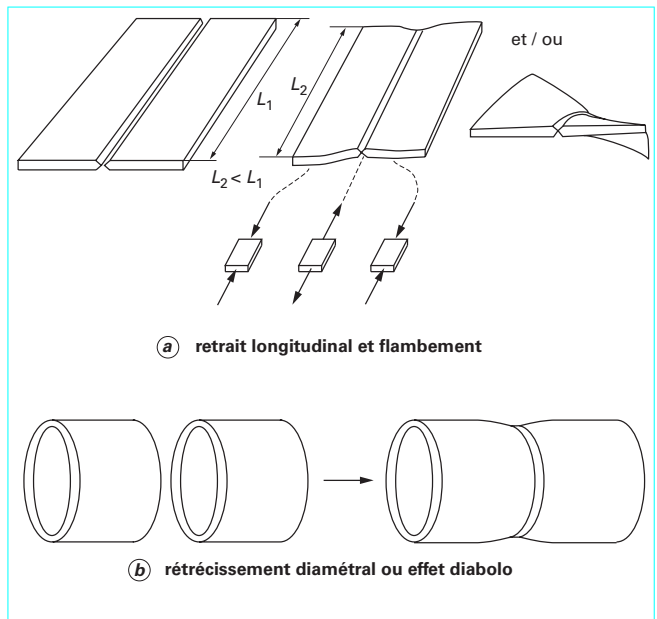


Figure 1 – Retrait longitudinal

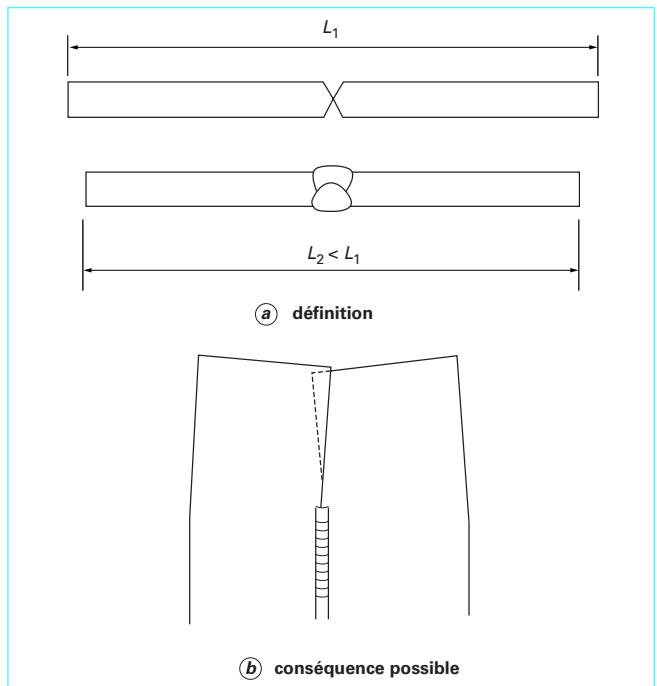


Figure 2 – Retrait transversal

l'avant de la torche (figure 2 b), en bloquant les deux bords l'un contre l'autre (§ 2.2.2).

● Retrait angulaire

Dans le cas de soudures avec chanfrein en V (c'est le cas de la majorité des soudures), le retrait va en augmentant depuis la base

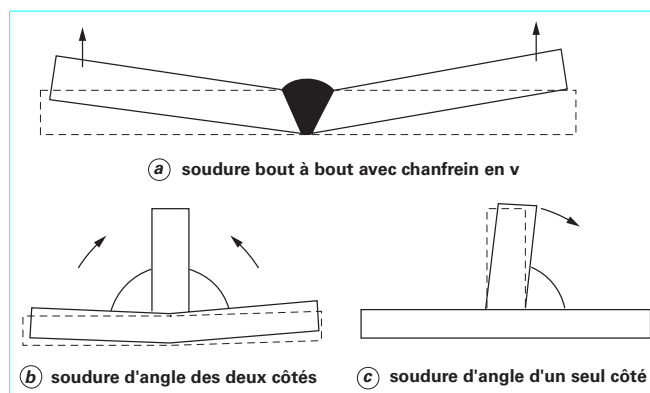


Figure 3 – Retrait angulaire

de la soudure jusqu'à la surface, alors que la base joue un peu le rôle d'une « articulation ». Cela crée une flexion dans un plan perpendiculaire à l'axe de la soudure (figure 3).

■ Dans le **cas général**, toutes ces composantes sont présentes et induisent des effets plus ou moins visibles, c'est-à-dire matérialisés par des déformations macroscopiques, mais elles existent, dans tous les cas, à l'échelle microscopique en terme de **contraintes** et de **déformations** locales. Le résultat peut être une déformation complexe de la pièce, à courte et/ou longue distance ; la figure 4 en donne un exemple.

Les **outillages de maintien** ne peuvent jamais annuler totalement les déformations créées par une opération de soudage. Ils ne suppriment pas non plus les contraintes résiduelles dans la zone de la soudure (parfois bien au contraire). Ils sont souvent là pour « faire travailler » le cordon de soudure en minimisant les déformations que peut prendre l'ensemble de la pièce (gauchissement, ovalisations).

Par ailleurs, sur un bon nombre d'aciers, le **champ de température** modifie la structure métallurgique des pièces, et, du même coup, les contraintes et les déformations. Un traitement thermique, après soudage, peut être appliqué pour améliorer les propriétés mécaniques de l'assemblage. Ces aspects plus métallurgiques sont traités dans l'article [M 715] *Soudage et soudabilité métallurgique des métaux*.

2.2 Outillages d'accostage et de bridage

2.2.1 Les différents rôles des outillages

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1, les outillages d'accostage et de bridage ont pour but de :

- positionner les pièces à souder pour que l'opération de soudage puisse se faire en respectant les tolérances requises ;
- maintenir cette position pendant le soudage ;
- limiter la déformation générale de la pièce pendant et après le soudage.

Les outillages sont mis en place avant le soudage et la plupart du temps avant le pointage. Ils peuvent être ajoutés parfois en cours d'opération, pour consolider ou corriger.

On pourra enlever ces outillages :

- soit après pointage, si l'agrafage rigidifie suffisamment la structure, ou en vue de permettre un accès de la torche aux zones à souder, particulièrement en soudage automatique ;
- soit une fois le soudage terminé ;

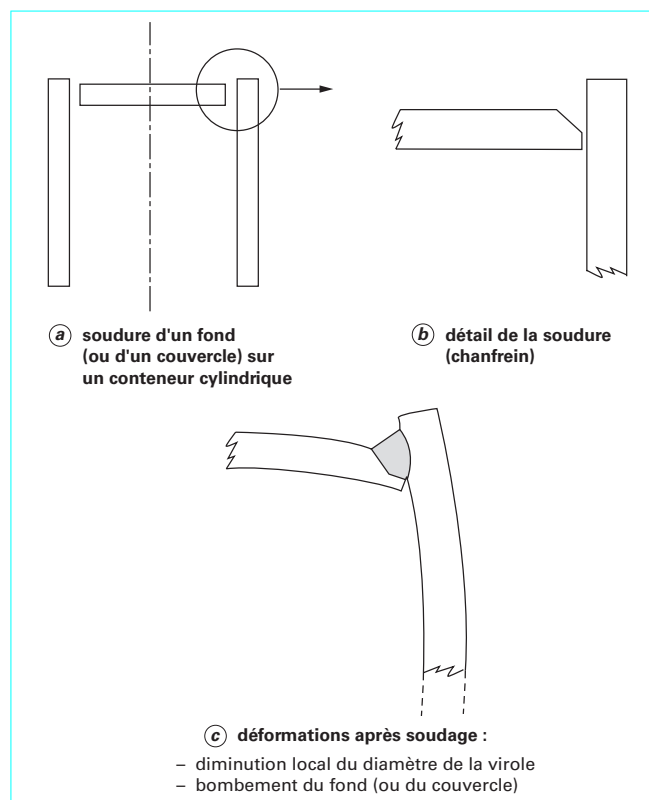


Figure 4 – Exemple de déformations cumulées

– soit après traitement thermique de détensionnement (ou revenu), lorsque, pour des structures à géométrie sensible, des déformations sont susceptibles d'apparaître lors de la montée en température dans le four de traitement ; dans un tel cas, les outillages doivent alors être conçus en conséquence.

Nous donnons, dans la suite, des exemples (non exhaustifs), pour les principales configurations que l'on peut rencontrer dans les industries qui mettent en œuvre le soudage, en indiquant, pour chacun, dans la mesure du possible, les déformations à combattre, le principe des outils, les moyens industriels utilisés.

2.2.2 Raboutage de tôles fines

Par « **tôles fines** » nous entendons des tôles d'épaisseur inférieure à 1 ou 2 mm, voire davantage, c'est-à-dire plus généralement toute tôle ou panneau dont les dimensions sont très grandes par rapport à l'épaisseur.

Les outillages d'accostage et de bridage lors du soudage des tôles fines, surtout en mode automatique, doivent répondre à plusieurs impératifs.

■ Accostage précis

Plus l'épaisseur à souder est faible, plus les conditions de soudage doivent être maîtrisées, et les tolérances plus étroites. Cela est particulièrement vrai en soudage automatique.

La réponse aux variations de configuration, pour des paramètres établis, est très violente : par exemple, une variation du jeu (écarte-

ment des bords à souder), même faible, peut faire osciller la soudure entre une non-pénétration et un effondrement, voire un trou.

À une préparation soignée des bords de tôles doit donc être associé un outillage qui plaque les deux bords, les aligne (au même niveau) en début de soudage, et doit garantir cet impératif d'un bout à l'autre de l'opération, depuis l'agrafage jusqu'à la fin du soudage.

■ Bridage pendant le soudage

Il s'agit, pendant l'opération de soudage (et d'agrafage si elle a lieu), d'éviter, ou du moins de limiter les déplacements, d'une part, des bords à souder, et d'autre part, des tôles dans leur ensemble.

La soudure à l'arc sur des épaisseurs fines vient affecter une bande de métal large par rapport à l'épaisseur, si bien que les deux effets principaux de la thermomécanique se font sentir dans les directions longitudinales et transversales.

- Pour limiter les **effets longitudinaux**, qui seraient des gauchissements dus à un flambement sous les contraintes se développant dans le cordon (figure 1 a), il convient de plaquer au mieux les bords près de la soudure et tout le long de celle-ci. Cela augmente l'allongement plastique dans la zone concentrée de la soudure, qui absorbe ainsi l'essentiel de la déformation : le gauchissement de la tôle au débridage est ainsi limité (figure 5).

- Les **retraits transversaux** se font sous des forces élevées : si l'on ne prend pas de précautions (outillage non adapté), ils peuvent provoquer un serrage très sévère des tôles dans leur plan, à l'avant de la torche au risque de les voir se chevaucher (figure 2 b). C'est une raison supplémentaire pour prévoir un outillage qui *plaque* parfaitement les bords et au plus près de la soudure.

■ Conditions thermiques

Compte tenu de l'étroitesse de la tolérance des réglages, les conditions thermiques doivent, elles aussi, être parfaitement maîtrisées et constantes le long du joint.

- L'outillage doit donc assurer un placage régulier des bords, par des « **doigts de serrage** » nombreux et articulés. Il n'est pas envisageable, en effet, de plaquer des tôles de 1 mm par exemple sur 500 mm ou 2 m de joint par deux « règles » de 500 mm ou 2 m placées de part et d'autre du joint ; celles-ci ne pourraient pas assurer un contact régulier entre la tôle et l'outillage ; ce montage provoquerait des variations importantes d'énergie thermique évacuée et ainsi des variations du comportement de la soudure (apparition de défauts la plupart du temps inacceptables tels que des manques de pénétration ou des effondrements).

Le principe est illustré sur la figure 5.

Les matériaux constituant la **latte** sur laquelle viennent s'appuyer les bords à souder ont un rôle de « **pompage thermique** » : ils viennent absorber une partie de l'énergie qui aurait diffusé dans la pièce. C'est un moyen efficace pour réduire fortement les déformations (gauchissements) sur les tôles fines. On utilise ainsi l'aluminium ou le cuivre.

La latte de soutien envers assure également, via une gorge longitudinale, le passage du gaz de protection envers (soudage TIG).

- Les doigts de serrage, ainsi que la zone de l'outil proche de l'arc, sont plutôt en acier inoxydable austénitique, donc sans magnétisme résiduel, afin de ne pas risquer de créer des déviations d'arc.

■ Des exemples de **bancs de serrage pour tôles fines** sont présentés sur les figures 6 et 7. On trouvera des précisions chez divers fournisseurs tels que SAF, Jetline, etc.

La figure 7 montre un outillage de soudage par transparence de tôles de 1 mm par procédé laser. La préparation se fait de la façon suivante : les 2 tôles sont posées l'une sur l'autre ; le faisceau laser vient traverser la tôle supérieure et former un cordon de soudure avec la tôle inférieure.

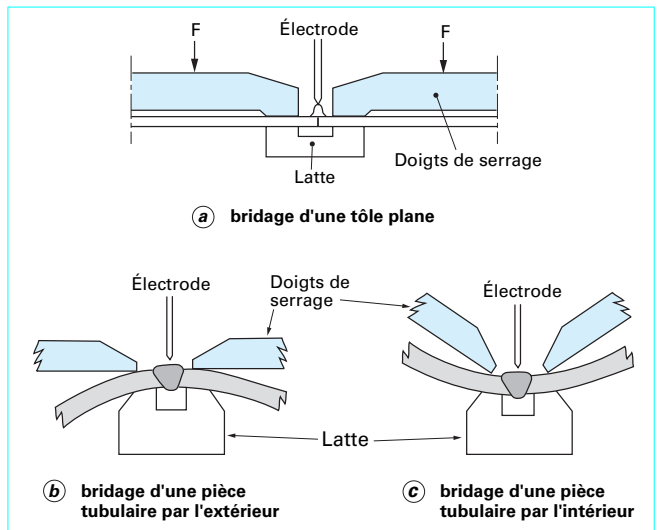


Figure 5 – Principe du bridage des tôles fines

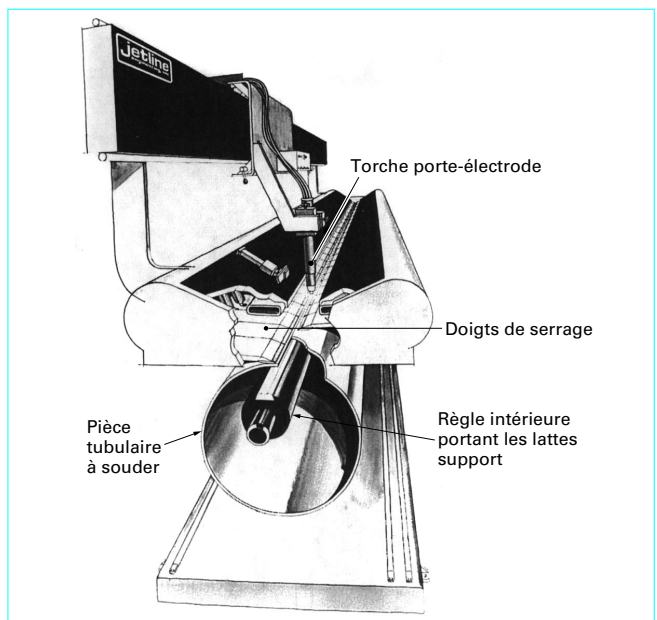


Figure 6 – Banc de soudage de tubes de faible épaisseur
[document Jetline]

2.2.3 Raboutage de tôles moyennes et épaisses

On peut entendre par **tôles moyennes** des tôles dont l'épaisseur commence à partir de 2 mm, par exemple, et va jusqu'à 5 ou 15 mm, selon la longueur de l'assemblage.

Au-delà de cette épaisseur, on parle de tôles épaisses ou fortes.

Une entreprise qui dispose d'équipements prévus pour souder des épaisseurs de 2 à 3 mm et qui pratique couramment ces domai-



Figure 7 – Outillage de soudage par transparence de tôles de 1 mm par procédé laser

nes d'épaisseur considérera, bien entendu, des tôles de 8 mm comme des tôles « épaisses ».

■ Les soudures se font généralement en plusieurs passes, et souvent par les deux côtés, ce qui peut nécessiter, selon la géométrie de la pièce, la position ou la masse, un ou plusieurs retournements.

Au fur et à mesure que l'épaisseur à souder augmente, la masse de la pièce joue le rôle de raidisseur, et un outillage devient vite inefficace :

- le **retrait longitudinal** est contrecarré par la masse de la pièce environnante ; toutefois, on relève encore des effets diabolos (figure 1 b) sur des soudures circulaires de tubes ou de viroles de 20 ou 30 mm d'épaisseur ;

- le **retrait transversal** se manifeste quelle que soit l'épaisseur ; il peut atteindre plusieurs millimètres et aucun outillage ne le supprimera. Une préparation par emboîtement (si elle est possible) limite fortement ce retrait transversal.

C'est le **retrait angulaire** qui apparaît, finalement, le plus fréquemment lors d'un raboutage de tôles moyennes. Il est difficile, voire impossible, de le combattre via un outillage. Seules des prédéformations ou des séquences judicieuses peuvent être efficaces.

■ L'accostage de **pièces massives** sera réalisé par des outils robustes, souvent soudés aux pièces elles-mêmes. On utilise pour cela des clamps, ponts, etc. La figure 8 donne des exemples.

Pour des **soudures d'angle**, l'effet le plus marqué est également le retrait angulaire (figure 3).

Les outillages, pour ces soudures d'angle, se résument à des équerres soudées sur les deux ailes à assembler (quand cela ne gêne pas le passage de la torche si on soude en automatique). La plupart du temps, s'il n'y a accès que d'un seul côté, c'est la structure de la pièce qui fait office d'outillage (poutres, caissons).

Si on a accès des deux côtés, on essaiera de jouer sur les séquences de soudage.

2.2.4 Soudures circulaires des tubes

Nous ne parlerons ici que des soudures circulaires (de raboutage). En effet, les soudures longitudinales restent le domaine des tubistes, peu nombreux, qui utilisent des procédés de soudage à grande vitesse et des outillages lourds spécifiques.

La tuyauterie occupe une place importante dans la profession du soudage, en fabrication, montage et maintenance de nombreuses installations industrielles. Aussi existe-t-il des équipements spécialisés dans le soudage des tubes et tuyauteries.

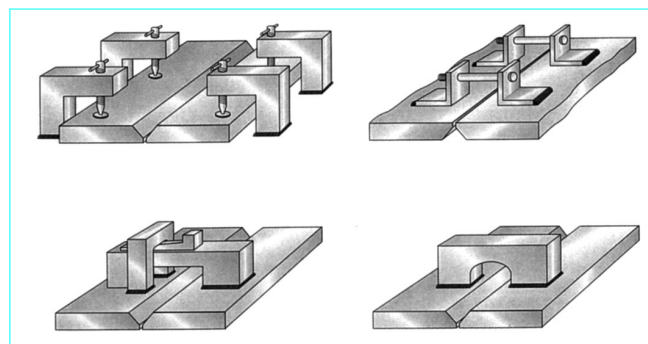


Figure 8 – Exemples des clamps et ponts (Document TWI)

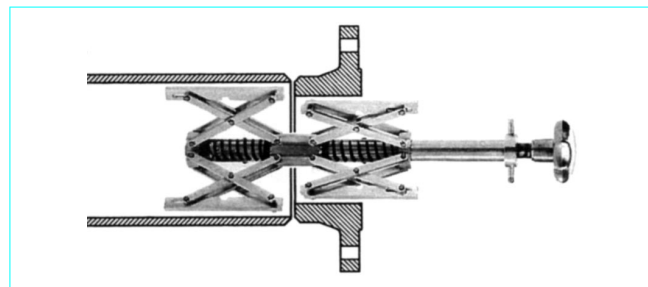


Figure 9 – Clamp interne type « Centromat »

■ L'accostage et le centrage des tubes ou portions de tubes peut être réalisé par des **outillages** variés :

- centreurs à action manuelle : vis et cônes par exemple ;
- centreurs à action hydraulique.

Les centreurs (alignement) peuvent agir par l'intérieur ou l'extérieur du tube.

● **Clamps intérieurs par systèmes articulés** pour des diamètres allant jusqu'à 1 m, mais n'exerçant pas d'effort suffisant pour reconformer.

Exemple : on trouve ce type de clamp « Centromat » chez Erfi et Amantis.

La figure 9 en donne une illustration.

● **Clamps intérieurs avec action hydraulique** (plusieurs centaines de bars) capables de se glisser à l'intérieur de tuyauteries sur plusieurs mètres.

Exemple : la figure 10 donne une illustration de ce type (système « Centrator »), qui assure les fonctions de mise au rond, d'alignement et de clamping.

● **Clamps extérieurs pour le centrage seul.** Il en existe de simples, à colliers ou à chaînes.

Exemple : on trouve ce type de clamp chez Pipe ou Erfi.

La figure 11 en donne une illustration.

Certains outillages comportent une armature circulaire robuste permettant un reconformage : clamp Dearman.

■ **Exemple** : la figure 12 [de chez Erfi] en donne une illustration.

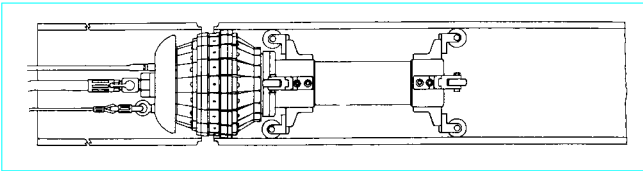
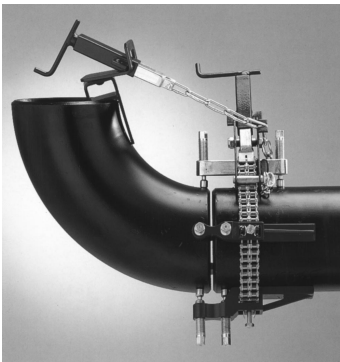


Figure 10 – Clamp interne à action hydraulique « Centrator »



(a) à vis

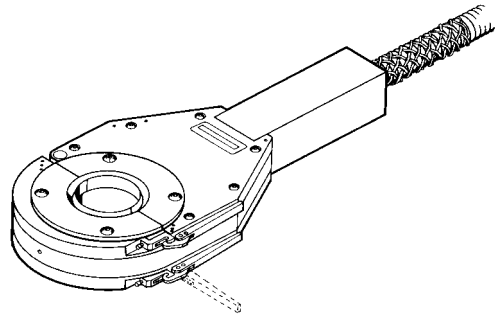


(b) à chaîne

Figure 11 – Centreurs par l'extérieur [document Pipe]



Figure 12 – Clamp avec vérins de reformage « Dearman »



(a) pinces pour diamètre faible [matériel Dimetrics]



(b) têtes orbitales pour diamètre plus grand [matériel Polysoude]

Figure 13 – Soudage de petits tubes

■ Pour des **petits tubes**, on trouve des pinces ou « cassettes » assurant l'ensemble des fonctions : centrage et soudage automatique.

Exemple : on trouve ce type de pinces chez Magnatec, Talley ou Dimetrics.

La figure **13 a** en donne une illustration.

Lorsque le diamètre augmente (au-delà de 40 mm par exemple) ; les dispositifs englobent également le tube et le bloc torche prend aussi de l'importance (figure **13 b**).

Pour les **tuyauteries**, dans le cas des **soudures de pipe-lines**, à terre ou en mer, ou de gazoducs, les impératifs liés au temps de réalisation de l'opération (contrôle compris) conduisent à utiliser des équipements complexes, lourds et coûteux qui assurent l'ensemble des fonctions de centrage et de soudage. Nous ne parlerons pas ici de ces matériels, « réservés » à quelques sociétés spécialisées.

Dans les **autres cas de soudures de tuyauterie**, les soudures sont la plupart du temps réalisées en manuel. L'outillage sert alors à assurer le centrage des tubes. En mode automatique, le soudage est généralement désolidarisé de la fonction de centrage. On trouve, pour assurer les mouvements de la torche de soudage, des systèmes orbitaux montés sur rails par exemple, dont nous reparlerons au paragraphe 3.4.

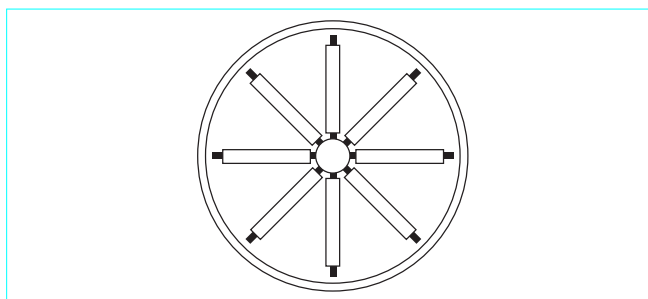


Figure 14 – Étoiles pour maintenir la circularité des viroles

2.2.5 Viroles

Les viroles obtenues directement sous la forme cylindrique, donc par forgeage, constituent des exceptions ; le domaine nucléaire est l'un des rares à adopter cette pratique.

Pour l'essentiel des cas, les viroles sont formées à partir de tôles qui sont roulées et fermées par une **soudure longitudinale**. Les appareils cylindriques (réservoirs, réacteurs et appareils à pression) sont formés de plusieurs viroles assemblées par des **soudures circulaires**.

■ Les **accostages**, dans les deux cas de soudure (longitudinale et circulaire), peuvent être assurés par des moyens de même type que pour des tôles planes : ponts, clamps (figure 8) ; ceux-ci peuvent être soudés sur les tronçons de virole.

■ Les **soudures longitudinales** provoquent quasiment toujours un retrait angulaire qui marque une cassure plus ou moins importante dans la rotondité de la virole. Comme nous l'avons dit dans le paragraphe 2.2.3, un outillage ne pourrait pas annuler cet effet ; seule la séquence de soudage peut le diminuer. Une opération de calibrage est souvent nécessaire.

■ Pour conserver la **rotondité des viroles** au cours du cycle de fabrication, on place généralement des étoiles à l'intérieur, pendant les soudures circulaires, voire pendant le traitement thermique (si ces outils le supportent).

Le principe est schématisé sur la figure 14.

3. Mise en mouvement en soudage automatique

3.1 Principe

■ Il s'agit d'assurer le **mouvement relatif entre la torche de soudage** (MIG - MAG - TIG - plasma - flux en poudre - feuillard sous flux) **et les bords à souder** ou la surface à recharger ou à revêtir.

On dispose de trois possibilités :

- déplacer la seule torche de soudage ;
- déplacer la pièce à souder, la torche restant fixe ;
- déplacer la pièce et la torche.

Nous ne discuterons pas ici des critères de choix de ces trois possibilités. La solution est parfois immédiate ; mais elle peut être complexe, par exemple dans le cas de nombreuses petites soudures à réaliser sur une pièce de géométrie non simple.

Il est intéressant de rappeler que l'une des raisons d'être de tous ces équipements de mise en mouvement de la torche et/ou de la pièce est de pouvoir souder en position dite « à plat », c'est-à-dire que le plan tangent à la surface à souder doit rester constamment horizontal. Cette position assure le maximum de taux de dépôt et le minimum de risque de défaut.

■ La plupart du temps, les **mouvements** à assurer seront simples : **rectilignes** ou **circulaires**. Les équipements correspondants seront d'autant plus robustes, moins chers et disponibles sur le marché que les mouvements seront simples.

Cependant, pour des raisons fonctionnelles, de masse ou de prix de revient, on est parfois amené :

- soit à réaliser des soudures de forme plus complexe (ni rectilignes, ni circulaires) ;
- soit à réaliser, sur une même pièce, plusieurs soudures simples.

Nous dirons quelques mots sur ces cas dans le paragraphe 3.5.

La suite du paragraphe a donc pour objet principal la description des équipements standards qui réalisent des mouvements simples pour des soudures rectilignes ou circulaires.

3.2 Mouvements rectilignes

3.2.1 Chariots sur rails

Des chariots légers, portant la torche de soudage, peuvent être montés sur des rails rigides ou flexibles. Les rails sont fixés à la pièce par des plots magnétiques ou des ventouses. Ces chariots font des soudures rectilignes, mais ils peuvent aussi suivre une courbure. Certains peuvent travailler en corniche, en vertical ou même au plafond. Ils peuvent disposer d'un oscillateur pour le balayage du cordon.

La précision modeste de positionnement de l'extrémité de la torche interdit le procédé TIG. Ces appareils trouvent leurs applications dans les soudures MAG ; ils sont beaucoup utilisés en soudure d'angle de grande longueur (plusieurs mètres).

On trouve également des chariots motorisés, plus lourds, équipés de têtes de soudage à l'arc submergé, avec un fil, voire plusieurs, (ESAB).

3.2.2 Poutres de soudage

■ La **torche** de soudage est montée sur un chariot qui se déplace sur une **poutre horizontale**.

Le **chariot** supporte généralement la bobine du fil d'apport, la trémie de flux en soudage sous flux, ainsi que, parfois, les boîtiers qui commandent le déplacement et la vitesse d'avance (vitesse de soudage), le départ du cycle de soudage, etc.

Les **longueurs** courantes des poutres sont de 2 à 4 m (il en existe de plus longues, bien entendu).

■ Les soudures de raboutage de tôles de faible épaisseur (quelques millimètres, voire 8 à 10 mm), ainsi que les soudures longitudinales de tubes dans cette même gamme d'épaisseur, se font sur des **bancs de soudage**. Ces bancs comprennent les deux fonctions suivantes :

- **Déplacement de la torche de soudage** (généralement par le procédé TIG) : c'est un système type chariot sur poutre, qui assure une vitesse de soudage constante et une bonne rectitude. La distance torche-pièce est, dans le cas du TIG, réglée par l'asservissement de hauteur d'arc (AVC, *Arc Voltage Control*).

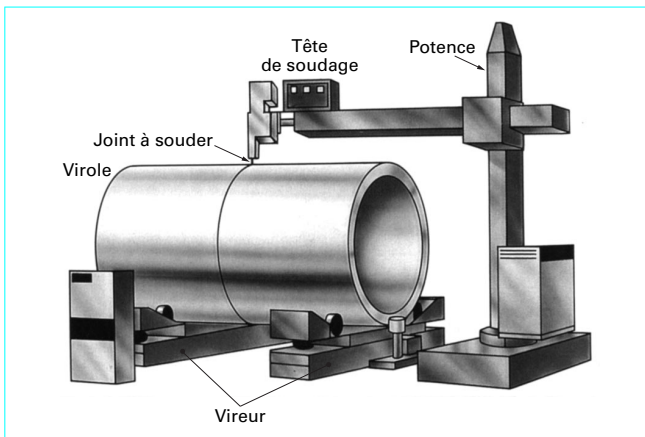


Figure 15 – Principe de l'association et vireurs [document ESAB]

● **Serrage des deux bords à souder**, c'est-à-dire positionnement, mise face à face et maintien des bords, comme nous l'avons décrit dans le paragraphe 2.2.

3.3 Grandes soudures circulaires

3.3.1 Association potences-vireurs

■ Le **principe** est d'amener la torche en un point donné de l'espace et de l'y maintenir. Le mouvement relatif torche-joint est assuré par un autre moyen.

La colonne de la **potence** est fixée au sol (elle peut, parfois, pivoter autour de son propre axe). Elle porte un chariot robuste, qui peut se déplacer verticalement le long de la colonne. Ce chariot porte lui-même un bras horizontal pouvant se mouvoir horizontalement. La tête de soudage est fixée en bout de bras.

On trouve fréquemment en chaudronnerie l'association potence et viroles sur vireurs. Le principe est schématisé sur la figure 15.

Généralement, la masse supportée par les potences est élevée : tête de soudage (arc submergé), bobine de fil, trémie du flux et, souvent, l'opérateur lui-même ; le tout peut dépasser 200 kg. Cette masse peut provoquer en bout de bras une flèche de plusieurs millimètres.

■ Le **fonctionnement** le plus fréquent est donc l'un des trois suivants.

a) Pièce circulaire, soudure circulaire par l'extérieur :

- la pièce est mise en rotation par des **vireurs** ;
- la torche est supportée par la potence.

b) Pièce circulaire, soudure circulaire par l'intérieur : même chose, le bras de la potence entrant à l'intérieur de la pièce.

c) Pièce de révolution telle que cône, demi-sphère ; soudure circulaire : la pièce est portée par un positionneur (§ 3.3.2), lequel la met en rotation face à la torche, elle-même fixée au bout de la potence.

On utilise cependant parfois la potence en tant que moyen de déplacement de la torche, mais il convient d'être prudent.

■ Les **potences** sont caractérisées principalement par les dimensions extrêmes, les courses des chariots, les masses maximales en bout de bras. Les hauteurs courantes et les portées des bras vont de 3 à 7 m, voire davantage bien sûr.

■ Les **vireurs** portent les pièces circulaires (viroles) destinées aux industries pétrochimiques (appareils à pression, réacteurs, distillateurs), ou autres (réservoirs, etc.). Certains vireurs sont équipés de galets moteurs et les autres de galets fous.

Les caractéristiques des vireurs sont :

- l'écartement extrême des galets ;
- la masse maximale qu'ils peuvent supporter ;
- les diamètres minimaux et maximaux des viroles.

La gamme classique des vireurs permet de supporter des charges allant de quelques centaines de kilogrammes jusqu'à une centaine de tonnes.

Un certain nombre de fournisseurs de tels matériels est donné en documentation.

On note que les vireurs sont parfois utilisés comme moyens de positionnement de pièces n'ayant rien de circulaire, constituées de plusieurs soudures longitudinales, par exemple des poutres longues et de grandes sections ou des caissons. On insère alors ces pièces longues dans des couronnes circulaires ou « cerces » que l'on vient faire rouler sur les galets des vireurs. Une fois trouvée la position correcte de la première soudure (pour soudage en « gouttière » par exemple), la soudure est réalisée par une torche montée sur un chariot d'une poutre indépendante. La première soudure terminée, il suffit de tourner les cerces d'un certain angle sur les vireurs pour positionner la deuxième soudure, etc.

3.3.2 Positionneurs

■ Les positionneurs comportent un plateau tournant dont on peut incliner l'axe de rotation. Pour les plus légers, l'inclinaison peut être manuelle, sinon les deux mouvements (rotation du plateau et inclinaison) sont motorisés.

Les positionneurs répondent à deux **objectifs**.

● Placer une pièce dans une orientation telle que le joint à souder se présente dans la position de soudage recherchée, c'est-à-dire le plus souvent en position « plat ». On garde la pièce fixe pendant que la torche se déplace.

● Faire tourner la pièce, sous une inclinaison fixe, pour réaliser des soudures circulaires en position « à plat ».

En soudage robotisé, outre ces deux modes de fonctionnement, le positionneur peut répondre à un troisième mode : celui de combiner le mouvement de la torche à l'extrémité du robot et de la pièce. Le positionneur constitue alors un axe supplémentaire piloté par le robot ; il peut aussi ne répondre qu'à des commandes simples telles que marche-arrêt.

■ Les positionneurs sont définis (figure 16) par les caractéristiques suivantes :

- la masse maximale supportée en position axe vertical (Q) ;
- le moment de flexion maximal M_f pour l'inclinaison pénalisante ;
- le moment de torsion M_t pour une charge décentrée.

Les charges vont de quelques dizaines de kilogrammes jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes (exceptionnellement à plus de 100 t).

3.4 Autres soudures circulaires

On peut considérer deux cas, selon que c'est la pièce qui tourne ou la torche.

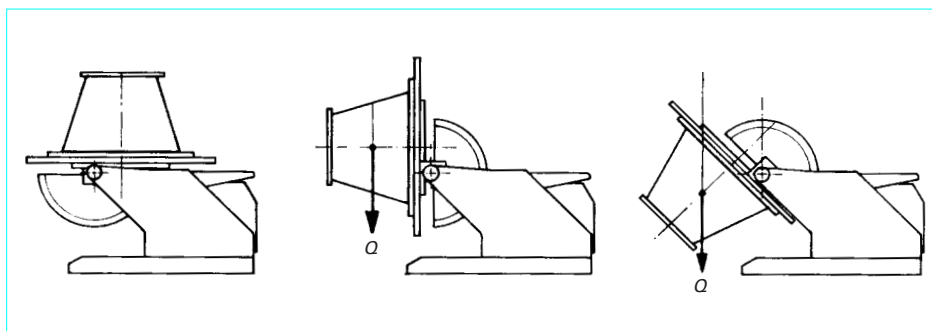


Figure 16 – Schéma d'un positionneur

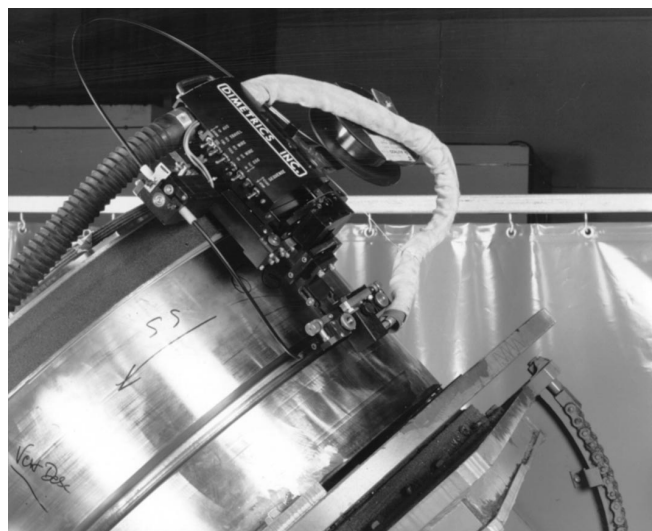


Figure 17 – Tête orbitale [machine Dimetrics]

3.4.1 Tours de soudage

On retrouve le principe des machines d'usinage, où la pièce est entraînée par un moteur dans son axe. La vitesse de rotation est bien sûr adaptée à la vitesse de soudage. La **torche** est **fixe**.

Ces équipements réalisent le raboutage de pièces cylindriques à partir de tout petits diamètres (10 mm par exemple).

Les diamètres souvent rencontrés vont de 20 à 300 mm, mais on trouve plus grand bien sûr ; il s'agit de carters, de réservoirs, de bouteilles (gaz ou autre).

3.4.2 Machines orbitales

Ces équipements sont destinés à faire le raboutage de tuyauteries fixes : c'est la **torche** qui se déplace en un **mouvement circulaire** autour de la pièce. Nous avons cité au paragraphe 2.2.4 les cassettes ou pinces destinées aux tubes de petits diamètres. Nous voyons maintenant le cas des diamètres plus importants (au-delà de 200 mm par exemple). Un rail est alors fixé sur la tuyauterie, et sur ce rail circule un chariot (tête de soudage) portant la torche.

La position de soudage est variable en permanence lorsque la tête avance (système orbital, toutes positions). Cela n'est plus vrai lorsque l'axe du tube est vertical, la position est alors constante, en corniche.

Le procédé de soudage est la plupart du temps le TIG.

La figure 17 donne un exemple de tête orbitale.

3.5 Mouvements complexes

Il est clair que le soudeur évite, lors de la conception, de prévoir des formes d'assemblage complexes, c'est-à-dire ni rectilignes ni circulaires. Cela augmenterait la complexité de la fabrication, sous plusieurs aspects :

- découpage, usinage des pièces, des bords et des chanfreins difficiles à réaliser, et chers ;
- changement de la position de soudage au cours d'un même joint ;
- obligation parfois d'avoir à recourir au seul mode de soudage manuel ;
- en cas d'automatisation, plus grande complexité de l'architecture de l'équipement.

■ En **soudage manuel**, le soudeur s'adapte aux changements de direction du joint, ainsi qu'aux diverses positions de soudage. Cependant, pour faciliter la tâche du soudeur et pour une meilleure qualité du joint, on prévoit de placer la pièce sur un équipement : vireur, et surtout positionneur.

Le soudeur peut déclencher lui-même (par une pédale) le mouvement de la pièce entre deux passes de soudage (entre deux fusions successives d'électrodes enrobées ou après avoir réalisé 30 ou 50 cm de soudure MIG-MAG).

■ En **soudage automatique**, on peut faire appel à l'un des concepts suivants :

- Une solution consiste à étudier une machine destinée à réaliser spécialement la ou les soudures. On parle de « **machine spéciale** » ou « **dédiée** ». De telles machines ainsi élaborées sont parfois très compliquées, à la fois du point de vue mécanique et du point de vue automatisme. Dans ce concept, un tel équipement ne vivra que le temps de la fabrication concernée. Il rendra exactement les services qu'on attend de lui, mais ne sera pas souple au sens où il n'acceptera pas toujours les modifications nécessitées par un changement de forme de la pièce, une variation de la séquence de soudage ou toute autre exigence liée au soudage lui-même.

Le pilotage de ces machines est passé des automates programmables et commandes numériques à des moyens intégrant davantage de convivialité vis-à-vis de l'opérateur soudeur.

- Depuis quelques années, on a tendance à remplacer ces machines spéciales par des équipements robotisés. Le **robot** sera intégré dans une « cellule », un ensemble comprenant en particulier le support de la pièce. On touche là à un domaine qui mérite à lui seul un article complet et que nous ne développerons pas ici.