

Soudage par résistance

par **Roland CAZES**

*Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité
ex-Directeur des Recherches. Société Sciaky*

1. Généralités	B 7 720 - 2
1.1 Principe	— 2
1.2 Différents procédés	— 2
2. Soudage par points	— 3
2.1 Principe	— 3
2.2 Description d'une machine à souder	— 4
2.3 Formation de la soudure	— 4
2.4 Paramètres du soudage par points	— 6
2.5 Phénomènes physiques intervenant pendant le soudage	— 7
2.6 Caractéristiques des soudures par points	— 7
3. Soudage à la molette	— 8
3.1 Principe	— 8
3.2 Description d'une machine à souder à la molette	— 8
3.3 Formation de la soudure	— 9
3.4 Paramètres du soudage à la molette	— 10
3.5 Caractéristiques des soudures à la molette	— 12
4. Soudage par bossages	— 12
4.1 Principe	— 12
4.2 Formation de la soudure	— 13
4.3 Caractéristiques des soudures par bossages	— 14
5. Soudage en bout par étincelage	— 15
5.1 Principe	— 15
5.2 Formation de la soudure	— 16
5.3 Paramètres du soudage par étincelage	— 17
5.4 Modes de soudage en bout	— 18
5.5 Caractéristiques des assemblages en bout	— 18

Cet article décrit les procédés de soudage qui conjuguent l'effet thermique et l'effet mécanique.

Le lecteur devra se reporter aux articles :

— **Soudage et soudabilité métallurgique des métaux** [M 715] dans le traité Matériaux métalliques ;

— **Pièces mécaniques soudées** [BM 5 185] [BM 5 186] [BM 5 187] [BM 5 188] [BM 5 189] [BM 5 190] dans le présent traité.

1. Généralités

1.1 Principe

L'invention du soudage par résistance est due à l'Américain Thomson en 1877.

Ce procédé met en œuvre l'effet Joule d'un courant de forte intensité traversant les pièces à assembler, mises au contact l'une de l'autre et sur lesquelles il est naturellement ou convenablement concentré.

La chaleur produite Q s'exprime par la formule :

$$Q = \int_0^T RI^2 dt$$

avec R résistance électrique rencontrée par le courant,

I intensité du courant,

T durée du phénomène,

t variable temps.

Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques diverses, la chaleur produite conduit à la **fusion des matériaux métalliques** usuels.

Le soudage par résistance consiste à faire en sorte que cette fusion se développe dans le plan de joint des deux pièces mises en contact.

Les différentes formes du soudage par résistance incluent (à quelques variantes près) une phase de **forgeage** dont l'importance métallurgique est fondamentale.

1.2 Différents procédés

Les procédés de soudage par résistance sont les suivants (figure 1) :

- le soudage **par points** donnant lieu à une soudure par recouvrement discontinue (§ 2) ;
- le soudage **à la molette** donnant lieu à une soudure par recouvrement continue et étanche (§ 3) ;
- le soudage **par bossages** ou protubérances (§ 4) ;
- le soudage **en bout** (§ 5), qui relève également du soudage par forgeage à chaud, dans lequel la chaleur est obtenue par effet Joule (par différence avec d'autres moyens de chauffage, tels l'induction, la friction, l'arc tournant, etc.).

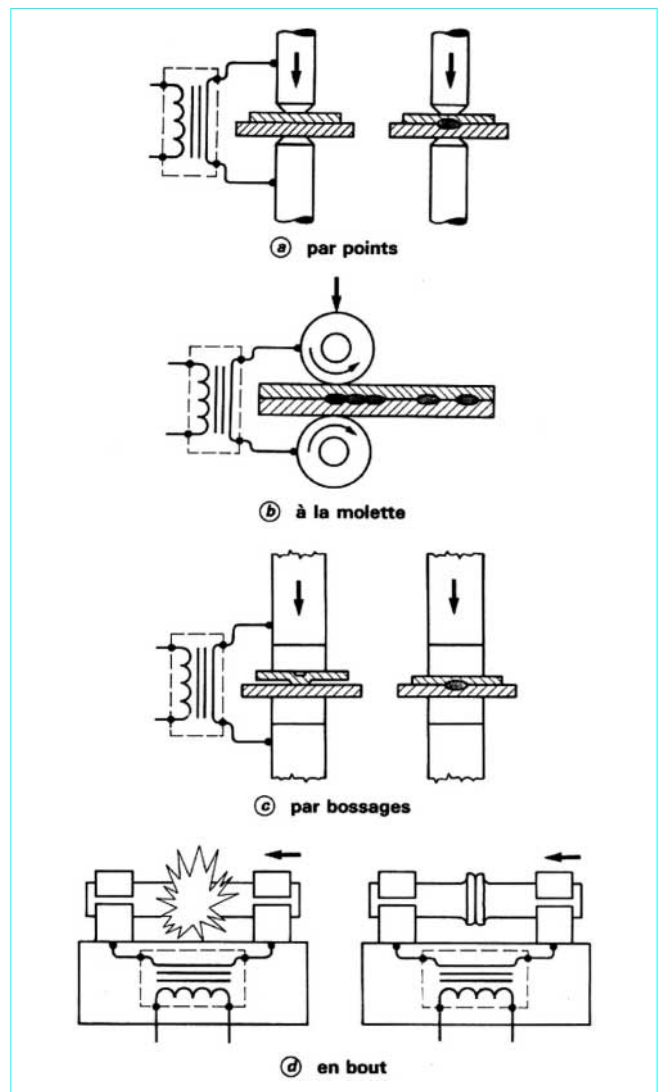


Figure 1 – Procédés de soudage par résistance

2. Soudage par points

2.1 Principe

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu, par recouvrement. Il s'applique à des assemblages en tôles d'aciers doux, allié, inoxydable, d'aluminium, etc. (article *Soudage et soudabilité métallurgique des métaux* [M 715]) d'épaisseurs généralement comprises entre 0,5 et 10 mm.

La figure 2 représente la configuration la plus conventionnelle du soudage par points de deux pièces au moyen d'une série de points de soudures exécutée par un opérateur sur une *machine à souder* (figure 2). Les deux pièces sont placées et maintenues dans leur position respective d'assemblage, puis introduites dans les bras de la machine. L'action d'une pédale déclenche pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes (figure 2c) :

- l'**accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent se serrer sur les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné ;
- le **soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance ;
- le **forgeage** ou maintien d'effort à la fin duquel les électrodes s'écartent et reviennent au repos.

Ces différentes phases, dont la durée totale reste de l'ordre de quelques secondes selon les épaisseurs, sont rigoureusement temporisées et se déroulent automatiquement.

Au coup par coup, la machine ne réalise qu'un cycle et il faut appuyer de nouveau sur la pédale pour en réaliser un autre.

À la volée, la machine fonctionne d'une manière répétitive, chaque cycle étant séparé du précédent par un intervalle de temps ou *temps mort* qui permet à l'opérateur de déplacer la pièce à souder. Sa durée détermine ainsi la *cadence* de travail.

L'ensemble de ces phases est appelé **cycle de soudage**, dont la figure 2d donne la forme graphique conventionnelle. Il existe de nombreuses formes de cycles appropriés aux matériaux à souder ou au niveau de qualité recherchée.

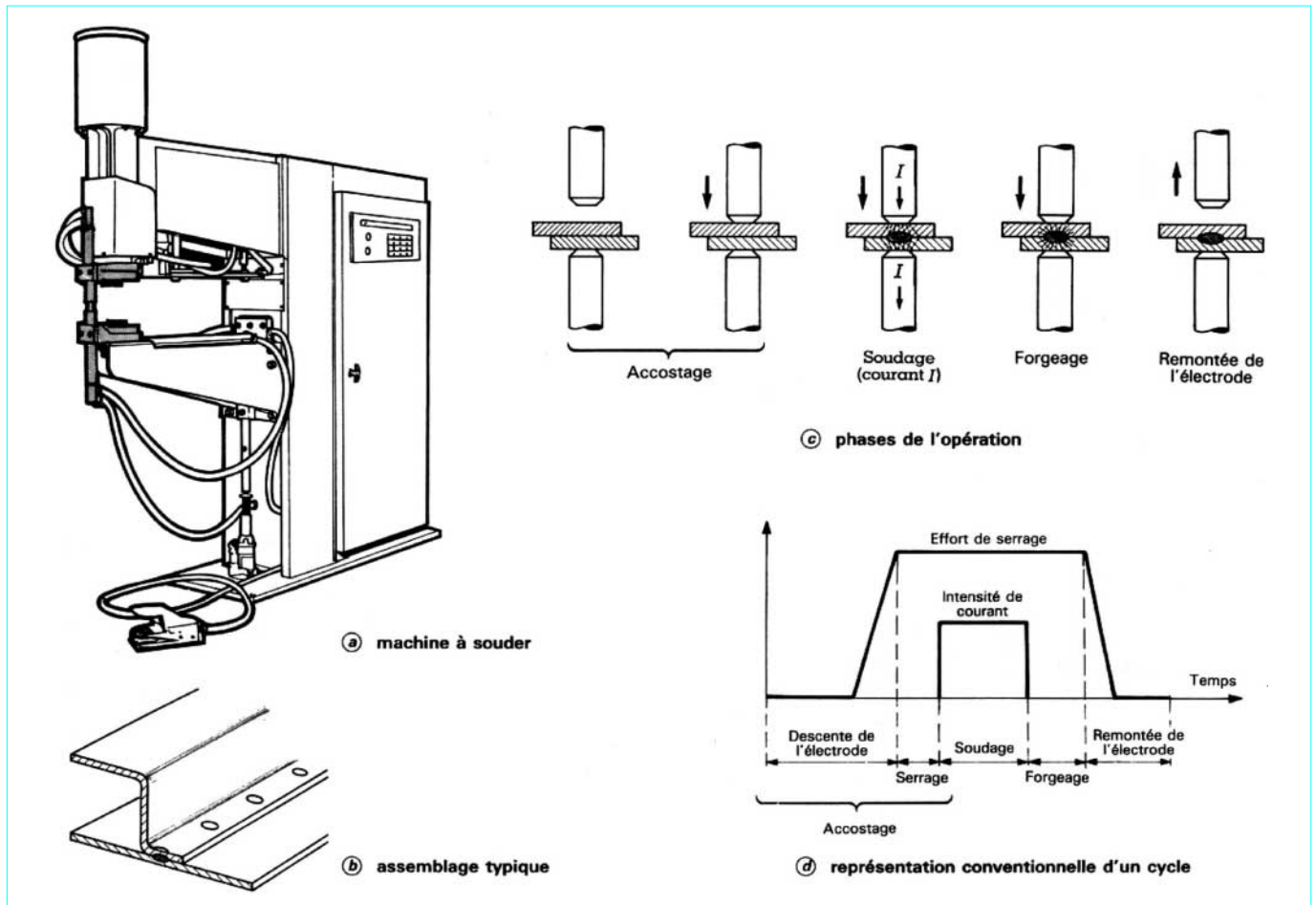


Figure 2 – Soudage par points

2.2 Description d'une machine à souder

2.2.1 Machine typique

La figure 2b représente une machine à souder par points *fixe* typique. On y distingue les éléments suivants :

- un bâti en C (ou col de cygne) qui supporte le bras supérieur et le bras inférieur ;
- une *tête d'effort* (ou de pression) fixée à l'extrémité du bras supérieur et généralement constituée par un cylindre pneumatique actionné par une valve, dont le rôle est de commander le déplacement de l'électrode supérieure et de lui appliquer l'effort ;
- un bras inférieur supportant l'électrode inférieure ;
- des conducteurs en cuivre refroidis par eau, amenant le courant aux électrodes ;
- un transformateur, dit *de puissance*, abaisseur de tension, et un contacteur primaire ;
- un coffret qui fournit les temps du cycle de soudage, ou *séquence*, coordonnant la descente de l'électrode supérieure et la fermeture du contacteur. Dans les installations modernes, il permet de fixer les valeurs, dites *paramétriques*, de l'intensité et de l'effort.

Aujourd'hui, les contacteurs utilisés dans la construction des machines à souder par résistance sont des thyristors et le réglage du courant s'effectue par déphasage, grâce à un circuit électronique inclus dans le coffret.

2.2.2 Variantes

Les variantes principales à la disposition précédente sont les suivantes :

- micromachines d'établi ;
- postes à pinces mobiles ;
- pinces à transformateur incorporé.

Les deux dernières dispositions sont fréquentes lorsque les pièces sont encombrantes. La pince devient alors un outil que l'on déplace.

Par ailleurs, le soudage par points se caractérise par une extrême facilité à disposer les éléments d'effort et de courant de façon adaptée à toute configuration particulière. Il en découle une pratique très employée dans la mise en œuvre de ce procédé, sous la forme de **machines dites à points multiples**, capables de réaliser en même temps un grand nombre de points et d'obtenir des productivités importantes. Ces machines constituent la quasi-totalité des équipements utilisés dans la construction des carrosseries automobiles.

De plus, le soudage par points se prête particulièrement bien à la **robotisation**, grâce à de puissants robots capables de déplacer des charges de 50 à 100 daN, telles les pinces à souder, avec une vitesse élevée permettant d'atteindre des cadences de 60 points par minute.

2.2.3 Autres dispositions

Le soudage par points peut être réalisé selon d'autres dispositions que celle typique décrite ci-dessus et appelée *soudage direct*. La figure 3 donne d'autres possibilités que l'on peut utiliser en vue de simplifier la conception des machines et leur mise en œuvre lorsque cela est possible. Certaines de ces dispositions donnent lieu à des dérivations de courant, dont il faut tenir compte car elles limitent les capacités.

2.3 Formation de la soudure

Dès le serrage des électrodes, nécessaire à l'accostage des tôles, le contacteur primaire se ferme et le courant s'établit dans le circuit secondaire. Il traverse les pièces à souder et rencontre, entre les

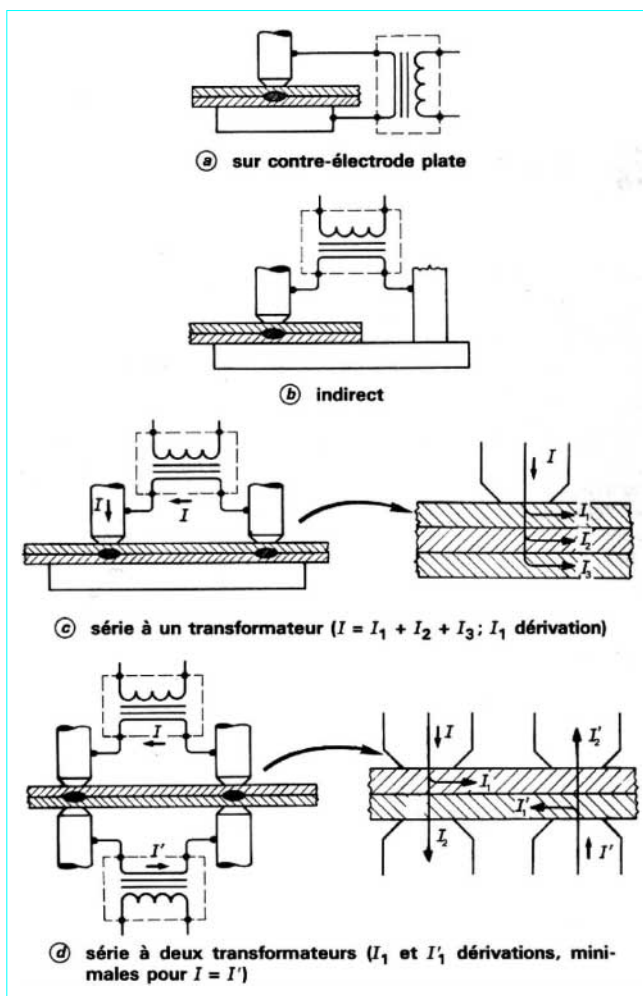


Figure 3 – Soudage par points : différents modes

électrodes, un certain nombre de résistances électriques (figure 4), les unes localisées aux interfaces (R_1 , R_2 , R_3) et les autres réparties dans la matière (R_4 , R_5).

Les premières résultent des phénomènes de contact. Ceux-ci, limités au début aux aspérités, se multiplient sous l'effort de serrage E et les résistances évoluent selon une loi $R = f(1/E)$. Les secondes sont dues à la résistivité des matériaux.

Par effet Joule, la température s'élève dans la zone de soudage, en premier lieu aux interfaces, où la résistance d'abord prépondérante diminue, puis dans la matière elle-même où la résistivité augmente avec la température. Au bout d'un certain temps, la fusion est atteinte au point central et progresse dans le plan de joint sous la forme d'un *lingot* formé en vase clos, qui atteint un diamètre comparable à celui des électrodes : le *point de soudure*. Le courant est alors interrompu. Le métal en fusion se refroidit, formant la liaison des deux tôles, les électrodes restant serrées avec effet de *forgeage* jusqu'au refroidissement quasi complet.

Une soudure par point se caractérise par ses dimensions (figure 7 et tableau 1) qui doivent être en rapport avec les épaisseurs des tôles à souder.

La figure 5 représente la coupe transversale d'un point de soudure avec ses différentes zones et leur nature métallurgique.

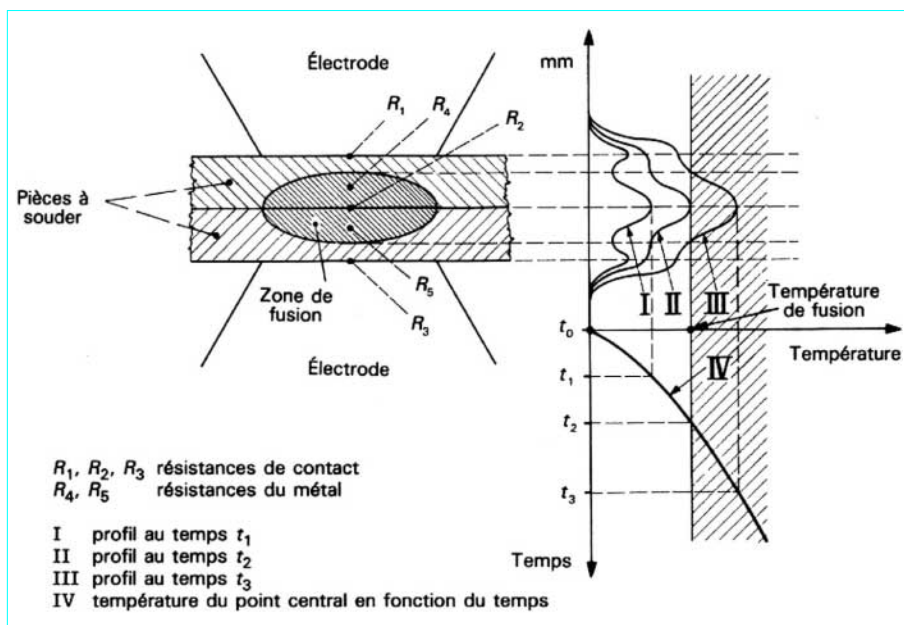


Figure 4 – Soudage par points : formation d'un point de soudure

Tableau 1 – Soudage par points : conditions de réglage

Aciers doux et mi-durs									Aciers inoxydables 18/8					
e (mm)	\varnothing de l'électrode (mm)	Soudage lent			Soudage rapide			\varnothing du point soudé (mm)	e (mm)	\varnothing de l'électrode (mm)	Effort de pression (N)	Intensité du courant (A)	Temps de soudage (s)	\varnothing du point soudé (mm)
		Effort de pression (N)	Intensité du courant (A)	Temps de soudage (s)	Effort de pression (N)	Intensité du courant (A)	Temps de soudage (s)							
0,5	4	600	2 000	0,2	1 500	4 000	0,04	4	0,5	4	1 750	3 750	0,04	3,5
1	5	1 000	3 000	0,4	2 500	8 000	0,1	5	0,8	4,5	3 000	6 000	0,10	4
2	7	2 000	5 000	1	5 000	14 000	0,3	6,5	1	5	4 000	7 600	0,14	4,5
3	9	3 000	8 000	2	8 000	19 000	0,6	8,5	1,5	6	6 500	11 000	0,20	5,5
4	11	3 800	10 000	3,2	12 500	24 000	0,9	10,5	2	7	9 000	14 000	0,24	6,5
5	13	4 500	12 000	4,5	17 000	28 000	1,4	12,5	2,5	7,5	12 000	16 000	0,28	7
8	19	.....	.....	.....	37 000	40 000	3	18	3	8,5	15 000	18 000	0,32	8
Alliages légers (suivant normes industrielles)						Alliages légers (suivant normes aéronautiques)								
e (mm)	r du dôme (mm)	Effort de pression (N)	Intensité du courant (A)	Temps de soudage (s)	\varnothing du point soudé (mm)	e (mm)	r du dôme (mm)	Effort de serrage (N)	Effort de pression de forgeage (N)	Intensité du courant (A)	Temps de soudage (s)	Temps de refroidissement contrôlé (s)	Temps de forgeage (s)	\varnothing du point soudé (mm)
0,5	75	1 800	15 000	0,04	2,8	0,5	75	2 000	6 000	25 000	0,02	0,04	0,02	3
0,8	100	2 300	25 000	0,04	4	0,8	100	3 000	7 000	31 000	0,04	0,08	0,06	4
1	110	2 500	30 000	0,06	4,5	1	110	4 000	8 000	35 000	0,04	0,08	0,08	5
1,5	150	3 200	40 000	0,06	6,2	1,5	150	6 000	13 000	50 000	0,06	0,12	0,12	7
2	180	4 000	50 000	0,08	8	2	180	8 000	18 000	64 000	0,08	0,16	0,14	8,5
2,5	210	5 200	55 000	0,1	9	2,5	210	12 000	28 000	80 000	0,10	0,20	0,18	10
3	240	6 000	60 000	0,12	10	3	240	15 000	36 000	98 000	0,12	0,24	0,20	12

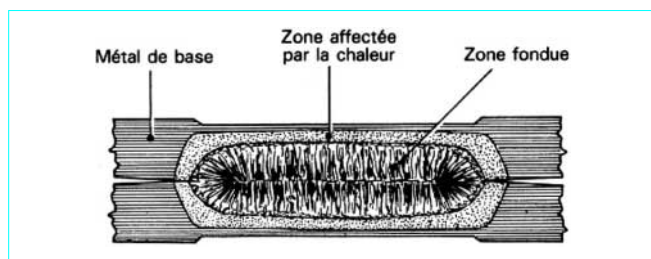


Figure 5 – Soudage par points : coupe d'un point de soudure

2.4 Paramètres du soudage par points

Les paramètres du soudage par points sont essentiellement :

- le diamètre des électrodes ;
- l'effort de serrage et de forgeage ;
- l'intensité du courant ;
- la durée de passage du courant et celle du forgeage.

2.4.1 Électrodes

Les électrodes (figure 6) sont des pièces en cuivre ou alliage de cuivre qui sont emmanchées dans des porte-électrodes fixés à l'extrémité des bras de la machine à souder et qui viennent en contact avec les pièces. Elles ont un rôle électrique, mécanique et thermique. Elles sont définies par leur diamètre et leur forme en fonction des épaisseurs à souder.

Le diamètre des électrodes détermine la dimension transversale du *lingot*. On admet que la zone fondue a un diamètre transversal d compris entre D et $1,2 D$, D étant le diamètre des électrodes.

Une règle tirée de l'expérience et formant recommandation, établit la relation entre le diamètre d'électrode D et les épaisseurs à souder e (en millimètres) :

$$D = 5\sqrt{e}$$

Dans certaines applications, comme le soudage d'alliages légers, il est préférable d'employer des électrodes à extrémités sphériques ou en dôme. Le rayon r dépend là aussi des épaisseurs à souder selon l'expression :

$$r = Ae + B$$

avec $A = 20$ et $B = 50$ mm pour l'acier doux et l'acier inoxydable,
 $A = 70$ et $B = 40$ mm pour les alliages légers,
 r et e en millimètres.

Les électrodes sont des pièces d'usure et considérées, avec l'énergie électrique et l'air comprimé, comme éléments consommables. Les électrodes s'usent par leur diamètre actif qui s'accroît en affectant les dimensions du lingot et ses caractéristiques. La tenue des électrodes conditionne donc la fiabilité du procédé. Elle doit être surveillée et optimisée. Les durées de vie, en nombre de points, vont de quelques centaines à plusieurs milliers, pour une qualité de soudure conforme à des critères courants.

2.4.2 Effort

L'action de l'effort s'exerce durant tout le cycle de soudage, c'est-à-dire avant, pendant et après le passage du courant.

■ Avant le passage du courant, il établit l'**accostage** des électrodes sur les pièces et des pièces entre elles.

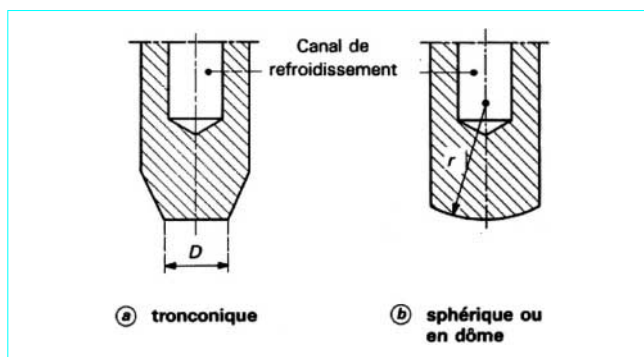


Figure 6 – Soudage par points : forme des électrodes

Il doit être suffisant pour vaincre la raideur des tôles, afin d'assurer la localisation du courant par déformation élastique. On est ainsi amené à augmenter l'effort dans le cas de matériaux très résistants mécaniquement et, lorsque les pièces sont très galbées et très raides, à prévoir un effort supérieur à celui des recommandations.

La raideur des tôles, augmentant rapidement avec l'épaisseur, est l'une des raisons pour lesquelles le soudage par points est limité à des épaisseurs de 8 à 10 mm, tous métaux confondus.

■ Pendant le passage du courant, les électrodes ont un **rôle électrique** et un **rôle thermique**, décrits par une loi générale :

$$R \text{ (résistance thermique ou électrique)} = f(1/E)$$

qui montre que l'effort E intervient indirectement sur la formation du lingot et sur la tenue des électrodes par la température atteinte à l'interface.

■ Après le passage du courant, l'effort appliqué effectue le **forgeage** de la soudure afin de lui conférer ses qualités mécaniques. L'application de cet effort ou son maintien explique que le temps associé est souvent appelé : forgeage ou maintien (de l'effort).

La valeur de l'effort unitaire appliqué dépend de la nature du matériau. Pour l'acier doux, par exemple, elle est de l'ordre de 50 à 70 N/mm².

Pour les tôles minces, de l'ordre du millimètre, cette valeur est suffisante pour assurer un bon accostage des pièces et une bonne tenue thermique des électrodes en soudage. C'est pourquoi, pour de telles épaisseurs, l'effort appliqué est maintenu simplement constant pendant tout le cycle de soudage.

Pour les tôles épaisses et raides, on fait appel à des efforts variables pendant le cycle. C'est également le cas pour les alliages légers.

2.4.3 Courant

L'intensité du courant dépend de la nature des matériaux à souder (par leur résistivité), des épaisseurs et de l'effort appliqué.

L'obtention de la fusion et d'un lingot de dimensions données est d'autant plus rapide que le courant est élevé. La limite supérieure est donnée par l'apparition de crachements et d'expulsions de métal fondu. Dans la pratique, on recherche cette limite pour situer juste au-dessous la valeur de l'intensité de travail.

On peut donner à l'onde de courant des formes appropriées à la thermique de la fusion : en deux paliers, en deux temps (pré-chauffage), progressive, modulée.

En soudage par résistance, le courant alternatif monophasé à la fréquence du réseau, donnant lieu à la mise en œuvre d'un simple transformateur comme générateur de courant, convient pour la majorité des matériaux. On utilise cependant des générateurs triphasés ou à courant redressé, mieux appropriés au soudage des alliages légers.

2.4.4 Temps de passage du courant

Il intervient physiquement par le biais de la notion d'énergie. Il découle donc d'abord du choix de l'intensité. En fait, sans même tenir compte des pertes, la réalisation d'un point de soudure s'accommode d'une grande latitude dans le choix du couple temps-courant. De là, la distinction que l'on fait entre le soudage dit *lent*, à faible puissance, et le soudage dit *rapide*, à forte puissance, lequel conduit à des résultats plus constants et à des soudures de meilleure qualité.

Compte tenu de la brièveté (fraction de seconde) de la formation de la soudure, les appareillages temporisateurs sont synchronisés sur la fréquence du réseau et les durées réglées en nombre de périodes.

Les différents temps d'un cycle complet sont exprimés pour cette raison en 1/50^e de seconde.

2.4.5 Quelques données paramétriques

Le tableau 1 donne quelques valeurs de paramètres de soudage par points, selon la nature du matériau et les épaisseurs de tôle.

2.5 Phénomènes physiques intervenant pendant le soudage

On a observé que, pendant la formation d'un point de soudure par résistance :

- la **résistance électrique** mesurée aux électrodes suivait une courbe en corrélation directe avec l'évolution de la dimension du lingot ;
- l'**expansion en volume**, due à la transformation de phase solide → liquide, induisait un déplacement mesurable de l'électrode supérieure, également en corrélation avec la dimension du lingot.

Ces phénomènes sont signalés ici, car ils sont la base de systèmes automatiques de contrôle non destructif de la qualité des soudures par points, en cours d'opération (*in process* en anglais).

2.6 Caractéristiques des soudures par points

Elles sont de natures :

■ dimensionnelle :

- diamètre du lingot (figure 7), mesuré sur une coupe macrographique ou après une opération de déboutonnage. Il est en relation avec la nature des matériaux et les épaisseurs ;
- pénétration, mesurée sur une coupe. Elle est de l'ordre de 60 à 80 % de l'épaisseur de la tôle. Elle conditionne, avec le diamètre, les propriétés mécaniques du lingot ;
- empreinte, mesurée directement ou sur une coupe. Elle ne doit pas dépasser 10 % de l'épaisseur de la tôle ;
- séparation des tôles : elle doit être négligeable, car elle découle de valeurs paramétriques trop élevées et dégrade la tenue mécanique ;
- l'écartement des points, leur position par rapport à la lisière de l'une des tôles, etc. sont également des critères intervenant dans la tenue globale de l'assemblage ;

■ mécanique :

- résistance au cisaillement par traction ;
- résistance à l'arrachement ;
- résistance à la torsion ;

reliées à la position et à l'écartement des points (figure 8).

■ métallurgique :

- structure des différentes zones affectées ;
- duretés (figure 9).

■ Défauts des soudures :

En dehors des défauts géométriques, ce sont :

- des défauts de structure (manque de compacité) ;
- des criques ;
- des porosités.

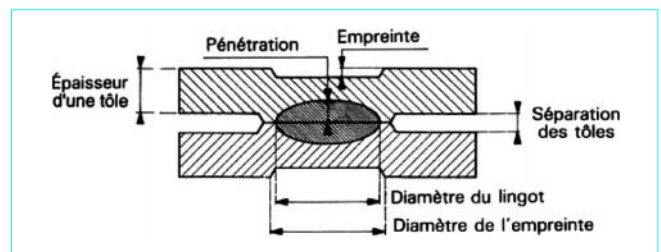


Figure 7 – Soudage par points : caractéristiques dimensionnelles d'un point de soudure

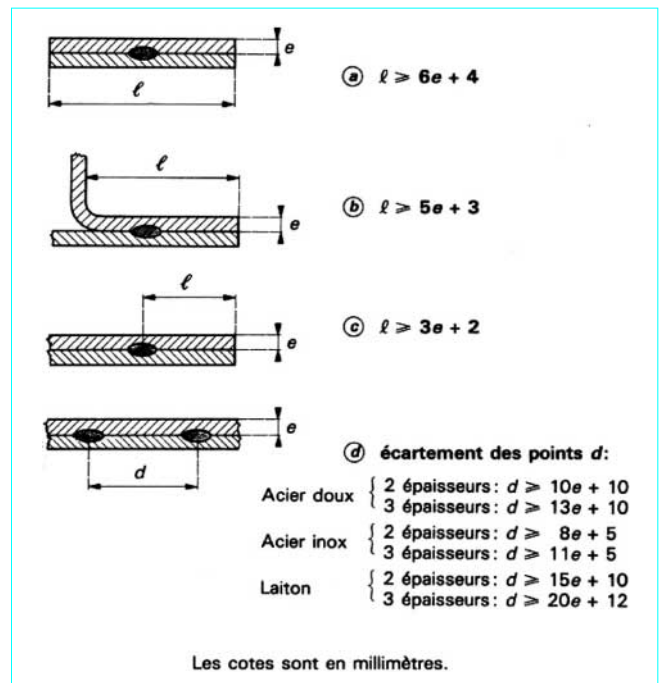


Figure 8 – Soudage par points : position des points

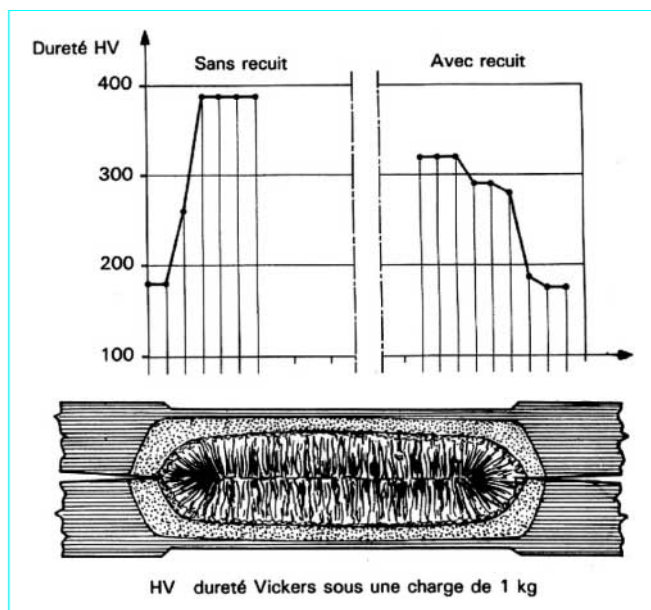


Figure 9 – Soudage par points : dureté d'un point de soudure

3. Soudage à la molette

3.1 Principe

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des disques en cuivre, ou *molettes*, qui par rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.

La soudure se réalise de façon progressive et continue, associant serrage des tôles et passage du courant, sur toute la longueur du cordon à réaliser.

Un cycle de soudage comporte donc les phases suivantes, similaires à celles du soudage par points :

- l'**accostage** : les deux molettes viennent serrer, pour les accoster et localiser le courant, les deux pièces à souder au point de départ ;
- le **soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire, et la rotation des molettes est engagée, créant une liaison continue ;
- l'**arrêt** qui commande l'écartement des molettes en fin de cordon.

Le cycle de soudage est celui de la figure 10 où l'on a également représenté une machine typique et les différentes phases opératoires.

Ainsi qu'il en sera question plus loin (§ 3.4.4), la soudure peut être due au passage de façon continue d'un courant alternatif, ou à celui d'un courant dit *modulé* donnant lieu à une soudure formée de points juxtaposés se chevauchant. Dans ce dernier cas, les molettes sont entraînées soit de façon continue, soit de façon discontinue, leur arrêt correspondant à la formation d'un point sur lequel il devient alors possible d'exercer un forgeage réglable, indépendant de la vitesse.

On utilise également le procédé pour réaliser des soudures discontinues non étanches, les molettes maintenues serrées réalisant alors entre les points un accostage mécanique des tôles qui ont toujours tendance à s'écarter naturellement (festonnage).

3.2 Description d'une machine à souder à la molette

3.2.1 Machine typique

Une machine à souder à la molette est constituée des mêmes éléments qu'une machine à souder par points, aux différences suivantes près :

- elle comporte, aux extrémités des bras et à la place des porte-électrodes, des *poupées* à paliers conducteurs transmettant le courant des bras fixes aux molettes tournantes ;
- leur transformateur est instantanément et thermiquement plus puissant, afin de prendre en compte une dérivation importante du courant à l'arrière et de supporter le cycle *molette* donnant lieu à un facteur de marche pouvant atteindre 50 à 100 % contre 10 % en soudage par points ;
- elle comporte un moteur d'entraînement des molettes qui sert également la plupart du temps à entraîner les pièces à souder.

3.2.2 Variantes

Une certaine liberté existe dans la mise en œuvre de ce procédé.

Sur la figure 11 ont été représentés les cas les plus courants :

- soudage sur molette plate (figure 11a) ;
- soudage sur électrode plate ou contre-électrode (figure 11b) ;
- soudage indirect (figure 11c) ;
- soudage série transversal ou longitudinal (figure 11d).

Cependant, d'une manière très générale, le soudage à la molette ne s'accommode pas de beaucoup d'écarts par rapport à sa mise en œuvre typique.

3.2.3 Autres dispositions

■ Soudage avec fil électrode continu

Cette configuration (figure 12a), utilisée de façon prépondérante dans le soudage de tôles revêtues (zinguées, étamées, etc.), permet de résoudre de façon significative le problème de la pollution des molettes par le revêtement qui s'allie au cuivre et dégrade leur fonction conductrice dès qu'elles ont effectué quelques tours. Le fil de cuivre interposé est bien entendu un élément consommable, mais il évite des complications de maintien des molettes en état par usinage continu, grattage, écrouissage, etc.

■ Soudage par écrasement

Cette façon de procéder (figure 12b) vise à éliminer la sur-épaisseur résultant du recouvrement lors du soudage à la molette classique. Elle nécessite de réduire et de contrôler le recouvrement des tôles, et de disposer de molettes plates, l'ensemble ainsi constitué permettant de localiser naturellement le courant. Grâce à un effort de serrage important, les bords portés à haute température fluent et laissent place à une liaison complètement écrasée. Cette manière de procéder s'appelle aussi *mash-welding* selon l'expression anglo-saxonne.

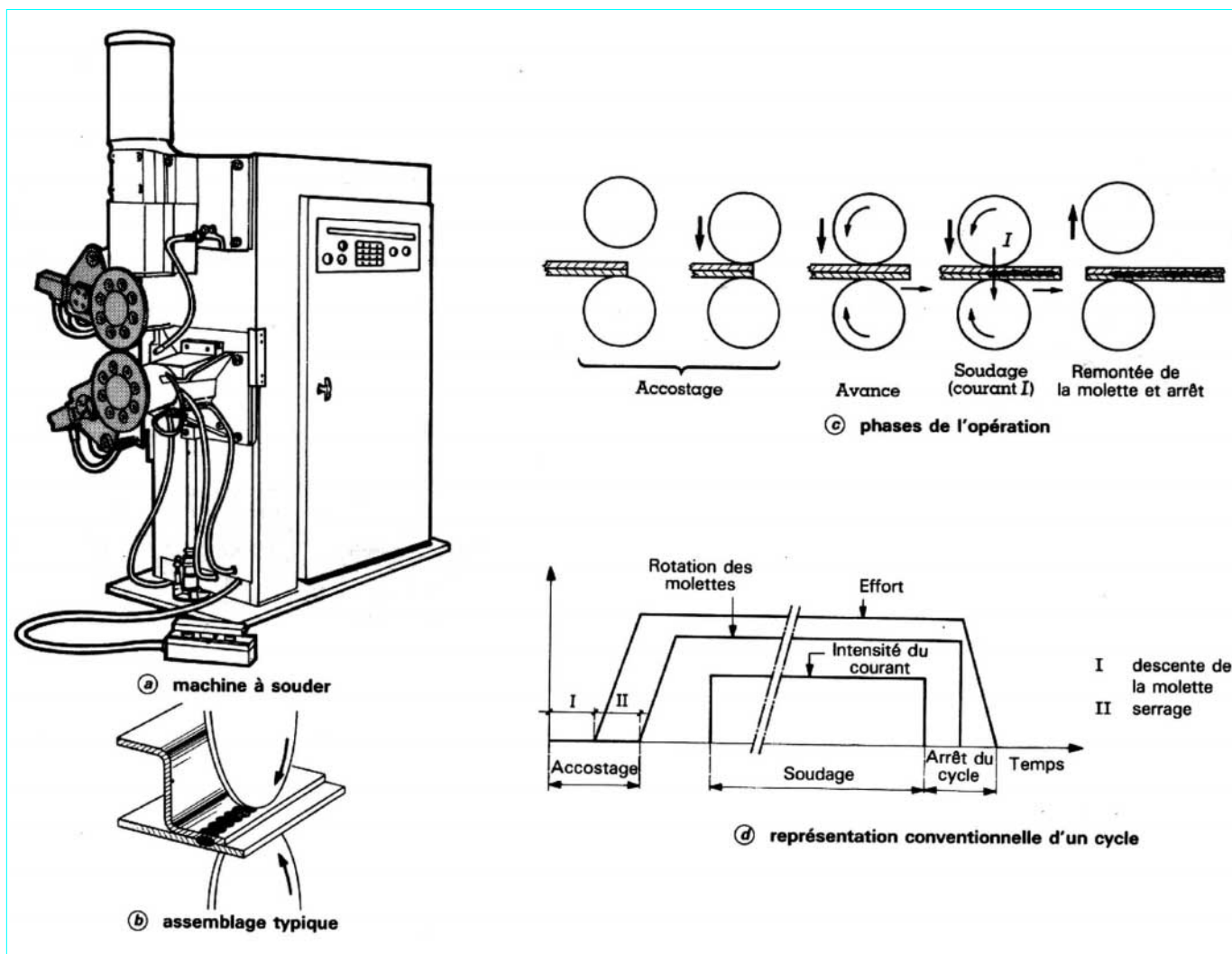


Figure 10 – Soudage à la molette

■ Soudage avec métal d'apport

Il vise le même objectif (figure 12c). Deux feuillards continus, formant métal d'apport, sont interposés entre les molettes et les tôles mises et maintenues bord à bord sans recouvrement. L'écrasement des feuillards qui se soudent aux tôles réduit complètement la surépaisseur en formant la soudure.

Remarque : la recherche de moyens de soudage continu de tôles bord à bord sans surépaisseur et à des vitesses supérieures à celle obtenue avec des procédés à l'arc (limitée au mètre par minute) a pendant longtemps retenu l'attention des constructeurs. Il semble qu'aujourd'hui ces assemblages soient réalisés par soudage au laser, mais avec beaucoup de précautions.

3.3 Formation de la soudure

Bien entendu, on retrouve au départ le rôle électrique des différentes résistances rencontrées par le courant lorsqu'il passe d'une molette à l'autre en traversant les tôles. Il faut ici tenir compte des effets dus au déplacement relatif molettes/pièces.

La figure 13a montre la disposition des divers éléments : on remarque que la surface de contact des électrodes, dont on a pu comprendre l'importance dans la détermination des dimensions de la zone fondue, est donnée par les empreintes des molettes dues à l'effort de serrage réglé en conséquence. Transversalement, on retrouve la configuration du soudage par points. Longitudinalement, la longueur de l'empreinte, due au diamètre de la molette associée à la vitesse de déplacement, entre dans la nouvelle expression du temps de soudage.

En effet, si d est la longueur de l'empreinte ou zone d'action des molettes qui détermine le passage de courant et V la vitesse de déplacement, le temps de passage du courant en un point est $t = d/V$.

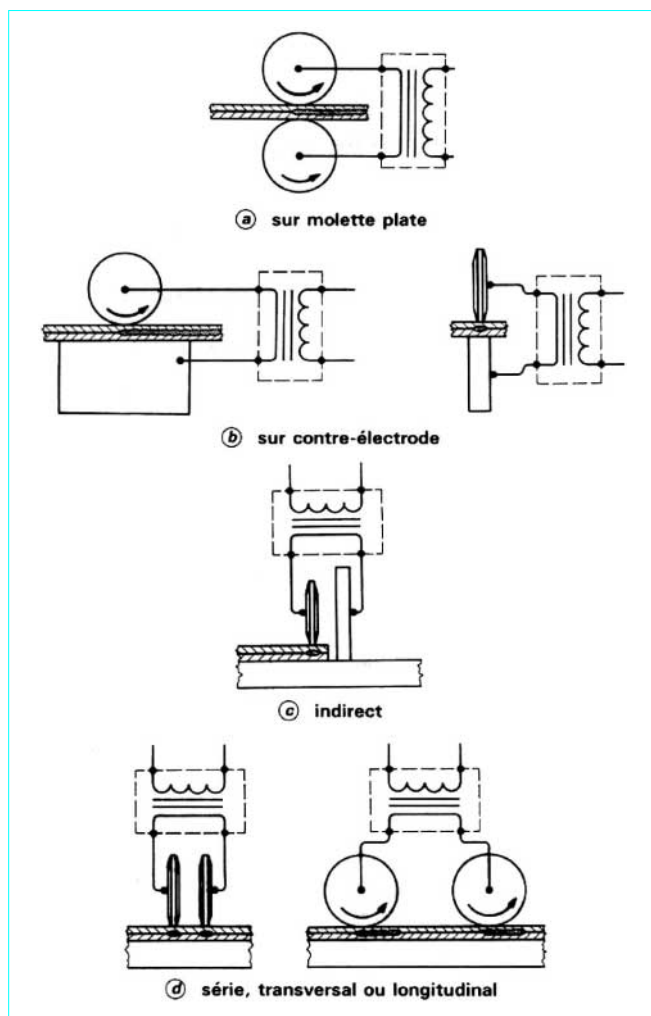


Figure 11 – Soudage à la molette : différentes dispositions

On peut tracer la loi de la température T en un point du plan de joint et voir comment se développent l'échauffement, puis la fusion, laquelle apparaît en A, puis s'élargit jusqu'en B pour donner lieu à un cordon de dimensions adéquates en largeur et en pénétration.

En effet, à partir de B le courant s'annule et la fusion ne progresse plus. Théoriquement, le serrage des molettes disparaît aussi et il n'y a pas de forgeage. C'est pourquoi les soudures réalisées dans ces conditions n'ont pas d'excellentes qualités mécaniques.

Afin de pallier cette difficulté, on a recours à la *modulation*. Si l'on accroît l'intensité du courant ou si l'on diminue la vitesse de déplacement, les instants A et B précédents vont se déplacer vers la gauche de la figure, de sorte que les dimensions du cordon seront atteintes plus tôt, encore dans la zone d'action des molettes. Maintenir le courant et continuer à chauffer conduirait à des expulsions de métal. C'est pourquoi on interrompt le courant en B tout en maintenant le serrage. Le cordon se refroidit sous l'effort des molettes qui forge la soudure (figure 13b).

On peut alors recommencer le cycle alternant *passage du courant-refroidissement*, appelé *modulation*, dont l'effet est de rendre à la soudure ses qualités mécaniques.

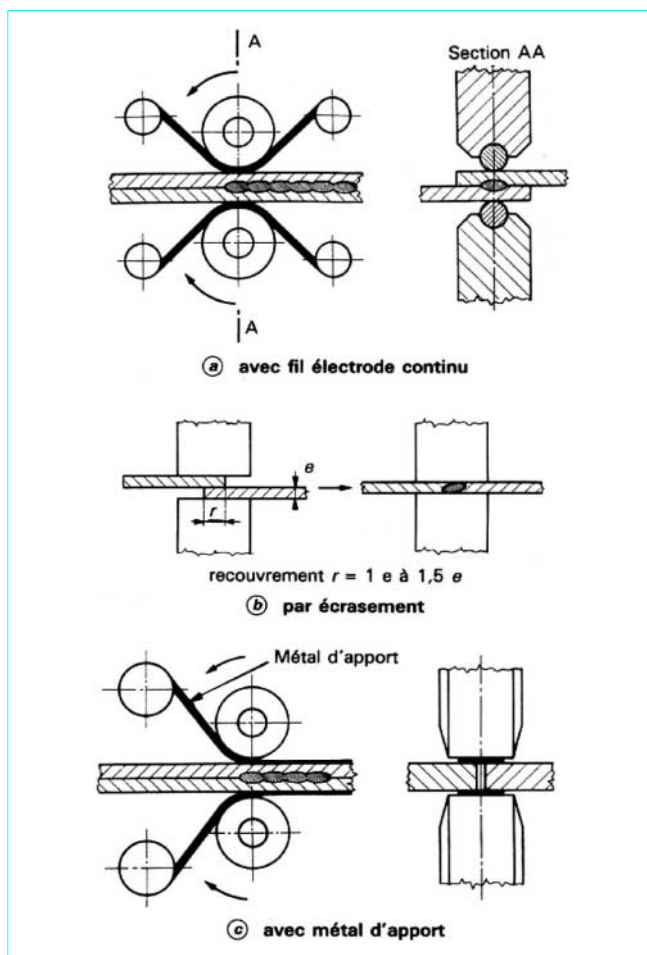


Figure 12 – Soudage à la molette : variantes

En fait, on a réalisé ainsi, à la volée et par déplacement continu, des points se chevauchant. Pour certains aciers réfractaires et pour les alliages légers, on arrête en outre la rotation des molettes pendant le passage du courant et le forgeage, puis on avance d'un pas (§ 3.4.2).

3.4 Paramètres du soudage à la molette

Les paramètres du soudage à la molette sont les suivants :

- les dimensions des molettes : épaisseur, pourtour et diamètre ;
- le courant et la modulation associée ;
- la vitesse ;
- l'effort.

Ces paramètres sont très liés les uns aux autres et le réglage d'une opération conduit souvent à un compromis global.

Pour former un cordon sur une épaisseur donnée, il faut une *assise de molette* donnant lieu à une voie de passage de courant et d'effort qui, compte tenu de la vitesse, conduise à une soudure de dimensions et qualité requises. L'assise des molettes est plus ou moins difficile à obtenir selon leur diamètre. Des molettes de petit diamètre (10 cm) indentent facilement les tôles à souder, mais s'usent plus vite.

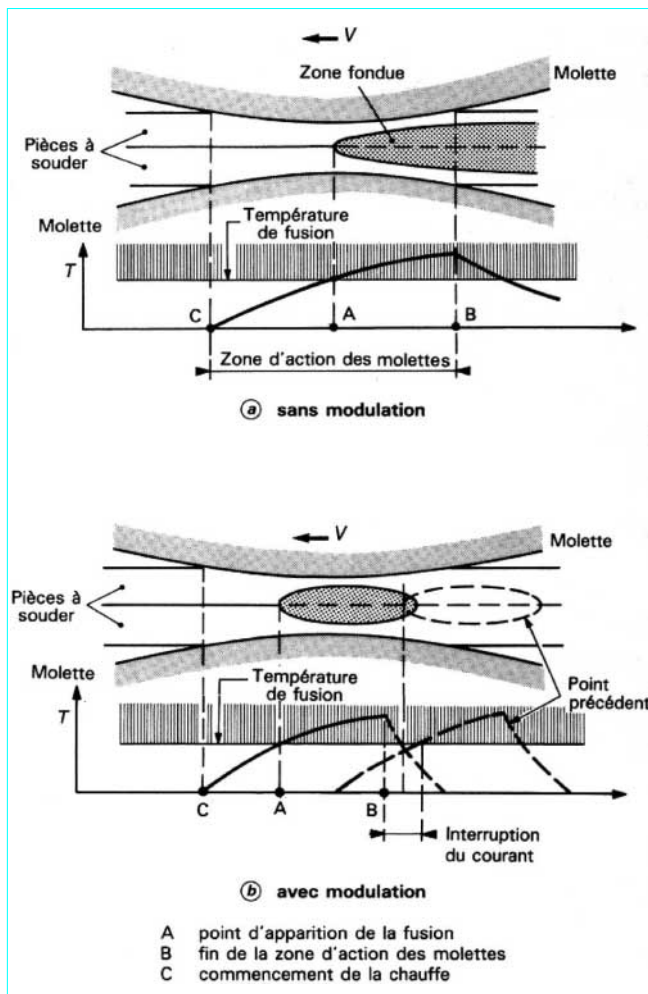


Figure 13 – Soudage à la molette : formation de la soudure

Le compromis se trouve dans des diamètres de molettes plus élevés (20 à 40 cm), donc vers plus d'effort, plus de courant, etc. D'une façon générale, une vitesse élevée (pour une productivité accrue) impose des molettes de très grand diamètre, très bien refroidies, et par suite une machine puissante.

Le réglage de la modulation en découle.

3.4.1 Molettes

Leur surface active, examinée de profil (figure 14), peut être plate ou en dôme. De ce point de vue, on retient des règles similaires au soudage par points, reliant ce profil avec la largeur et la pénétration du cordon :

profil en biseau (figure 14a) :

$$D = 2e + 2$$

profil en dôme (figure 14b) :

$$r = 50 \text{ mm pour } 0,5 < e < 1,5 \text{ mm}$$

$$r = 75 \text{ mm pour } 1,5 < e < 2 \text{ mm}$$

profil en dôme prononcé ou molette mince (figure 14c) :

$$r = 3 \text{ mm}$$

avec D (mm) largeur du plat,

e (mm) épaisseur des tôles à souder.

Le choix du diamètre des molettes s'effectue souvent en fonction de considérations pratiques de passage autorisé par la forme des pièces à souder. Il est évident que les rayons que doit observer la forme d'un cordon seront de nature à imposer, s'ils sont courts, des molettes réduites.

Lorsque les cordons n'ont pas d'exigences sévères quant à leur tenue mécanique, on pourra se contenter de molettes réduites et opérer à vitesse élevée. Par contre, en construction aéronautique et pour des matériaux réfractaires, les vitesses seront plutôt faibles, les efforts importants et les molettes déterminées en conséquence.

La tenue dans le temps des molettes est étroitement liée à leur tenue thermique. C'est pourquoi, lorsque cela est possible, on dispose d'un arrosage extérieur abondant. Certaines machines sont équipées d'un dispositif à même d'usiner le profil des molettes au fur et à mesure de son usure par apparition de bourrelets latéraux.

Ce sont les problèmes liés aux molettes qui limitent les épaisseurs soudables à quelques millimètres, avec très peu de différence entre les deux (ou trois) tôles en cause.

3.4.2 Vitesse

Elle intervient comme facteur de productivité, mais elle est limitée par des considérations de qualité. En effet, par disparition du forgeage, les caractéristiques mécaniques des soudures diminuent lorsque la vitesse augmente (figure 15).

La vitesse est liée à la variable temps de soudure et, également grâce à la modulation, au forgeage. C'est la raison pour laquelle, dans les cas extrêmes, on arrête les molettes en synchronisme avec le passage du courant. On réalise alors des soudures par points chevauchants, sur lesquels on applique un véritable cycle de forgeage indépendant de l'effort de soudage. Cette façon de procéder est appelée soudage en *roll-spot*.

3.4.3 Effort

Il a deux effets principaux :

- il définit, pour un diamètre de molettes donné, la surface de contact ;
- il conditionne, comme en soudage par points, la puissance d'échauffement.

Lorsque les molettes entraînent les pièces à assembler, l'effort est conditionné par cette exigence et le soudage en dépend.

3.4.4 Courant et modulation

Tout comme l'effort, le courant est fonction des matériaux à souder, de leurs épaisseurs et de la vitesse de soudage, donc du diamètre des molettes.

La modulation permet d'appliquer au soudage à la molette les avantages du soudage en temps court, rencontrés en soudage par points. L'intensité est réglée, toutes choses égales par ailleurs, au-dessous de la limite où apparaissent des expulsions (crachements).

3.4.5 Quelques données paramétriques

Le tableau 2 donne quelques valeurs de paramètres de soudage à la molette, selon la nature du matériau et les épaisseurs de tôle.

Tableau 2 – Soudage à la molette : conditions de réglage

Aciers doux						Aciers inoxydables 18/8						Alliages légers					
e (mm)	Effort de pression (N)	Intensité du courant (A)	Temps de travail (s)	Temps de repos (s)	Vitesse ⁽¹⁾ (m/min)	e (mm)	Effort de pression (N)	Intensité du courant (A)	Temps de travail (s)	Temps de repos (s)	Vitesse ⁽¹⁾ (m/min)	e (mm)	Effort de pression (N)	Intensité du courant (A)	Temps de travail (s)	Temps de repos (s)	Vitesse ⁽¹⁾ (m/min)
0,5	2 500	10 600	0,02 à 0,04	0,04	2,30	0,5	3 300	8 250	0,02	0,04	1,40	0,5	2 600	23 600	0,02	0,02	1,25
0,8	3 400	13 000	0,02 à 0,06	0,04	2,10	0,8	4 000	12 000	0,04	0,06	1,30	0,8	3 300	28 600	0,02	0,06	1
1	4 000	15 000	0,04 à 0,06	0,04	1,90	1	5 800	12 800	0,06	0,06	1,20	1	3 800	32 000	0,04	0,06	0,90
1,5	5 250	17 500	0,04 à 0,08	0,06	1,70	1,5	8 100	15 100	0,06	0,08	1,10	1,5	4 300	36 000	0,04	0,08	0,75
2	6 750	21 000	0,06 à 0,12	0,08	1,50	2	10 000	16 500	0,08	0,10	1	2	4 800	42 000	0,06	0,10	0,60
2,5	8 000	26 000	0,08 à 0,14	0,10	1,30												
3	9 500	30 000	0,10 à 0,20	0,16	1,10												

(1) Vitesse de déplacement pièces/molettes.

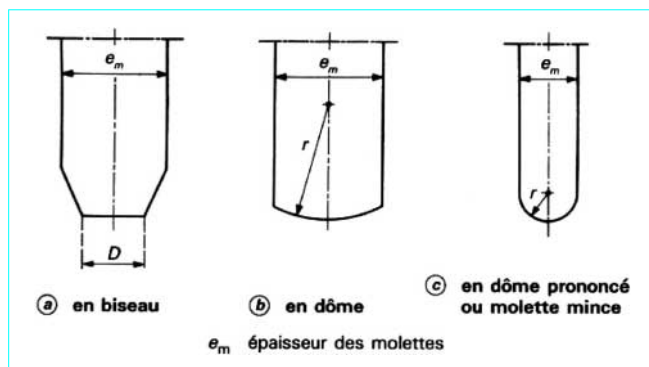


Figure 14 – Soudage à la molette : profils de molette

3.5 Caractéristiques des soudures à la molette

Les critères relatifs à la qualité des soudures continues à la molette sont :

■ dimensionnels :

- largeur du cordon de soudure (fusion),
- pénétration,
- empreinte des molettes en surface,
- séparation des tôles,
- positionnement par rapport aux bords des tôles ;

■ métallurgiques :

- structure des différentes zones,
- dureté,
- absence de défauts (porosités, criques) ;

■ mécaniques :

- résistance à la traction ,
- étanchéité sous pression.

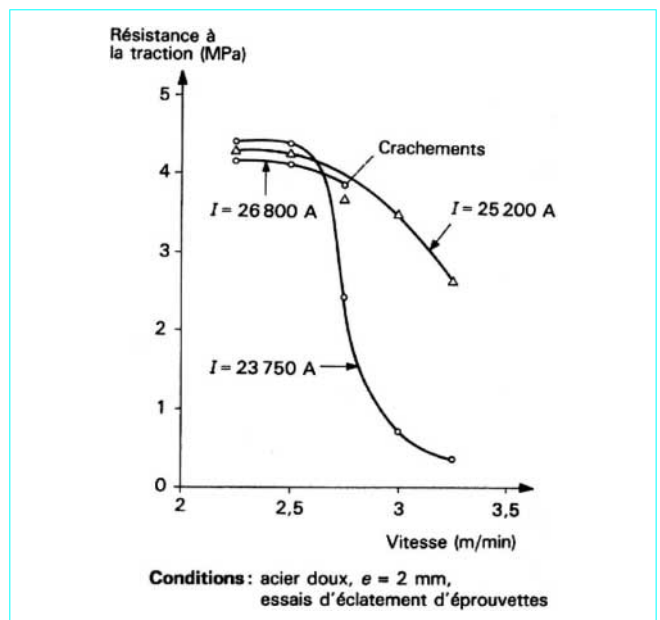


Figure 15 – Soudage à la molette : effets de la vitesse de soudage sur la résistance de la soudure

4. Soudage par bossages

4.1 Principe

Ce procédé est également appelé **soudage par protubérances** ou **soudage par projections** (de l'anglais *projection-welding*).

Il permet de réaliser des assemblages continus ou discontinus par superposition ; mais il se distingue du soudage par points ou à la molette en ce que la localisation du courant et de l'effort sur la zone de soudage n'est pas obtenue par les électrodes, mais par la géométrie des pièces à souder elles-mêmes. Il est, de plus, un procédé de soudage global.

La figure 16 donne trois exemples typiques d'assemblage par bossages ou s'y ramenant :

- a) soudage de deux tôles à plat. L'une des tôles a reçu préalablement par emboutissage un certain nombre de **bossages** qui vont servir à localiser courant et effort ;
- b) soudage d'une bride sur une plaque, sur toute la périphérie ; la soudure est continue et étanche et s'effectue par la fusion du chanfrein prévu dans ce but ;
- c) soudage de deux fils en croix. C'est le cas intéressant où la localisation est naturelle et où les pièces ne doivent subir aucune préparation.

Dans tous les cas, le courant est amené aux deux pièces à souder au moyen de blocs en cuivre qui servent également à appliquer l'effort de soudage. Ces blocs en cuivre ont des formes adaptées à celles des pièces ; largement dimensionnés, ils sont peu sollicités et peu affectés par l'usure.

L'opération de soudage de deux pièces a un caractère global : un seul cycle de machine suffit pour effectuer l'ensemble des soudures prévues pour l'assemblage des deux pièces positionnées et maintenues par les blocs en cuivre qui deviennent ainsi de véritables outillages de soudage.

On retrouve dans ce cycle les mêmes phases précédemment examinées en soudage par points (§ 2.1) :

- l'**accostage** : les deux outillages se serrent sur les pièces préalablement positionnées ;
- le **soudage** : le courant passe et s'accompagne de l'affaissement des bossages ;
- le **forgeage** : à la fin duquel les outillages s'ouvrent.

Il faut alors passer à une autre pièce, de sorte que les machines à souder par bossages (figure 17), bien que similaires dans le principe aux machines à souder par points, ne comportent pas de marche *à la volée*. Il est cependant très facile de les équiper de dispositifs d'alimentation chargeant et déchargeant automatiquement les pièces, ce qui les ramène à ce fonctionnement.

4.2 Formation de la soudure

La figure 18 représente un bossage type créé sur une tôle plate, qui va permettre d'examiner les phénomènes généraux du procédé. Lorsque les pièces sont en place et serrées entre les outillages, dès la fermeture du contacteur primaire, le courant traverse le bossage suivant les lignes de courant représentées. Il rencontre les différentes résistances de contact et celles dues à la résistivité des matières à souder. Mais ici, les résistances de contact électrodes-pièces n'ont plus aucune importance, car la densité de courant y est si faible qu'il ne s'y crée plus de chaleur utile, et les outillages n'ont plus, pour la même raison, aucun rôle thermique pendant la formation de la soudure.

La température s'élève dans le bossage et la chaleur diffuse dans la tôle plate où, par suite de la dissymétrie, elle n'intéresse pas un volume aussi important.

Très rapidement, sous l'effort, le bossage va s'écraser et les deux pièces vont se rapprocher jusqu'au contact.

L'expérience prouve que le courant et l'effort vont continuer à être localisés sur le bossage et sur lui seul.

Bien que les *électrodes* soient plates et très larges, on constate alors que tout se passe comme en soudage par points : apparition d'une zone fondue se développant transversalement et *à cheval* sur le plan de joint, en vase clos, pour finalement atteindre, si le courant est suffisant, un diamètre équivalent à celui du bossage d'origine.

On arrête alors le passage du courant et l'on maintient l'effort pendant le refroidissement et la recristallisation qui l'accompagne. La coupe effectuée sur une telle soudure fait apparaître les mêmes aspects métallurgiques qu'un point de soudure.

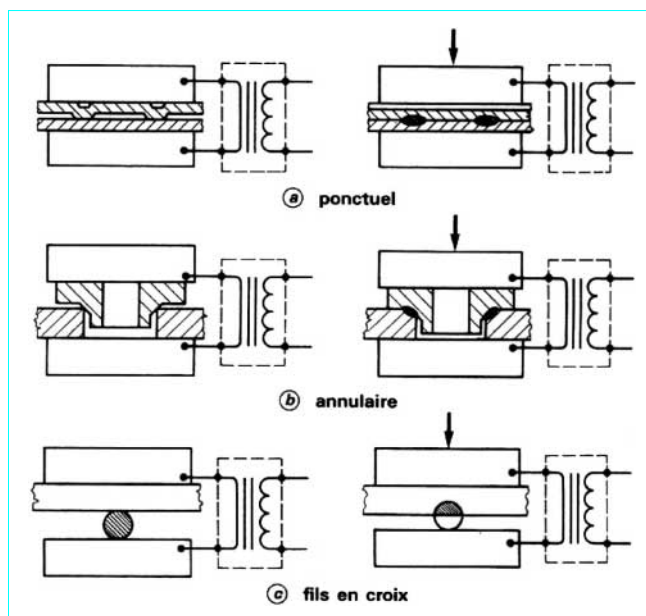


Figure 16 – Soudage par bossages : exemples typiques

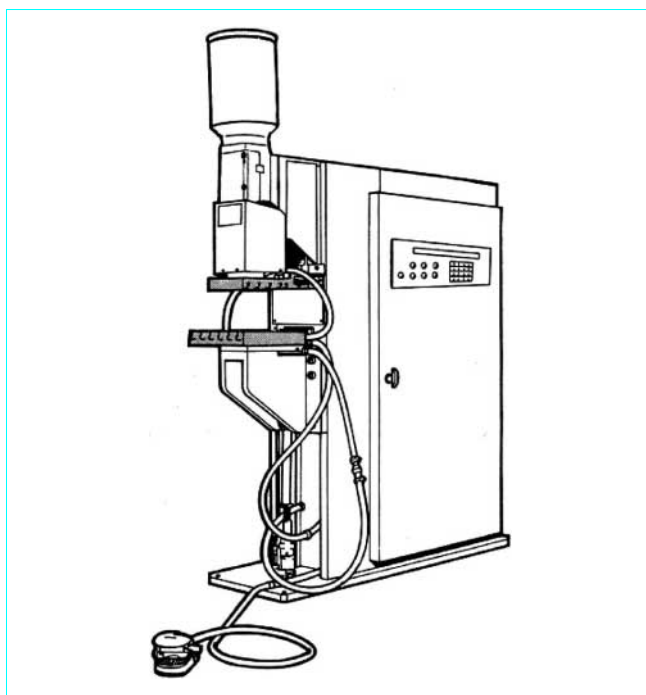


Figure 17 – Soudage par bossages : presse à souder équipée de plateaux rainurés

Des phénomènes identiques se développent dans tous les autres cas d'application, tels le chanfrein de la bride ou les fils en croix (§ 4.1), et l'on y retrouve les mêmes effets quant à l'équilibre des températures et l'affaissement en cours de chauffe.

On peut également étendre le raisonnement au cas fréquent d'une plaque comportant plusieurs bossages soudés simultanément, car il est facile d'obtenir entre eux une excellente répartition du courant et de l'effort. C'est là un des avantages du soudage par bossages. D'ailleurs, en contrepartie, il serait difficile de les réaliser successivement à cause de l'affaissement qui produirait diverses déformations des pièces. Cela devient ainsi une obligation et, par suite, dans certains types d'assemblages, une limitation. C'est en quoi le procédé doit être considéré comme *global*.

On se reportera, pour l'examen de chacun des paramètres, au paragraphe sur le soudage par points (§ 2), se limitant ici à une étude comparative, avec lui, des avantages et des inconvénients.

4.2.1 Comparaison avec le soudage par points

■ **Avantages :**

- meilleure fiabilité grâce au comportement des outillages qui ne sont pas sujets à usure ;
- possibilité, à épaisseur égale, de souder en un coup des sections plus importantes ;
- possibilité d'obtenir des zones fondues de formes très diverses et, en particulier, de réaliser des soudures annulaires étanches ;
- faculté de réaliser des assemblages sur pièces massives ;
- possibilité de réaliser des soudures en T, etc.

■ **Inconvénients :**

- impossibilité, sauf dans des cas très limités, de souder des alliages légers : l'absence de fusion pâteuse ne permet pas l'écrasement progressif et donne lieu à une expulsion de métal ;
- difficulté d'équilibrer la fusion dans certains cas ;
- limitation de la dimension des pièces qui ne permet plus, lorsqu'elle devient trop importante et que les bossages doivent être répartis, de réaliser une bonne répartition du courant ;
- impossibilité de souder en même temps deux bossages situés sur deux plans non parallèles et faisant entre eux un angle inférieur à 90°.

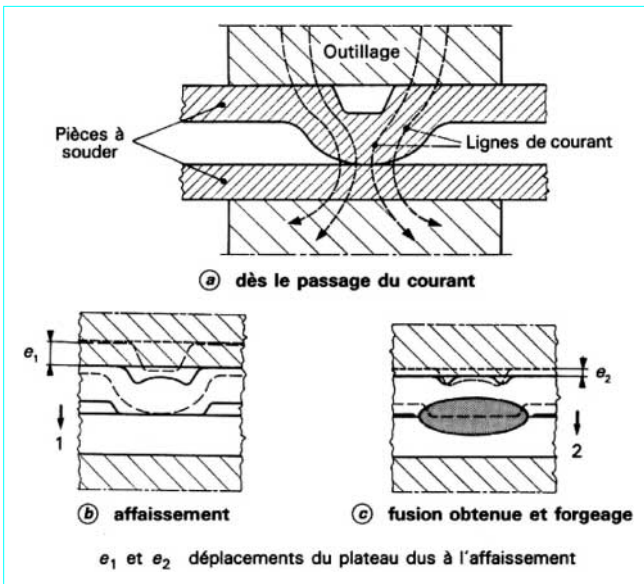


Figure 18 – Soudage par bossages : formation de la soudure

4.2.2 Cycles de soudage par bossages

Le cycle type du soudage par bossages est représenté sur la figure 19.

L'accostage et le soudage s'effectuent sous un effort limité pour ne pas écraser les bossages. En fin de chauffe, par contre, il faut produire brusquement un effort important, l'effort de forgeage, pour prévenir, lorsque la fusion se développe, toute expulsion de métal.

On peut éventuellement effectuer un préchauffage pour égaliser les efforts entre plusieurs bossages. Ce fonctionnement exige de la part des machines une réponse rapide dans le mouvement de la tête.

4.3 Caractéristiques des soudures par bossages

4.3.1 Critères et formes d'assemblage

On a beaucoup plus de liberté dans la mise en œuvre du soudage par bossages que dans le soudage par points.

Les critères de positionnement et les critères dimensionnels relèvent de cas d'espèce et dépendent plus des conditions de réalisation des bossages que de leur soudage. L'expérimentation sur échantillon devient indispensable dans les cas extrêmes.

Le soudage par bossages est le domaine des petits assemblages (figure 20) pouvant requérir des précisions mécaniques élevées que permettent de satisfaire les outillages de soudage.

Le soudage des fils en croix constitue un domaine important de ce procédé. Il s'étend depuis des diamètres de quelques dixièmes de millimètre jusqu'à 20 mm.

4.3.2 Paramètres du soudage par bossages

Le tableau 3 donne les conditions de réglage pour le soudage par bossages (avec e épaisseur des tôles) et le soudage de fils en croix (avec \varnothing diamètre du fil).

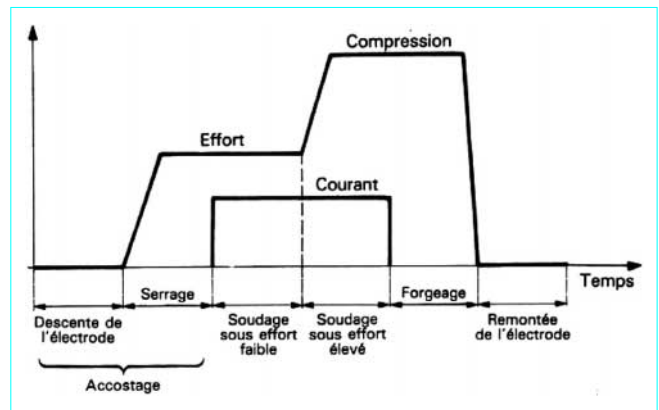


Figure 19 – Soudage par bossages : cycle

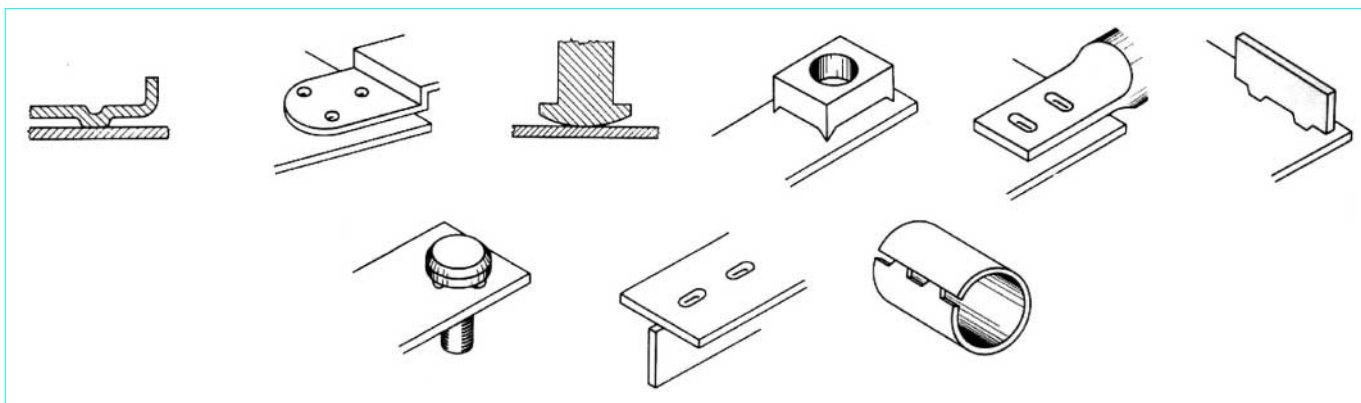
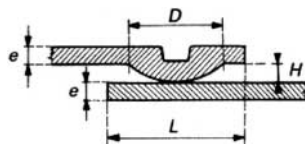


Figure 20 – Soudage par bossages : assemblages typiques

Tableau 3 – Soudage par bossages : conditions de réglage

Aciers doux								Aciers inoxydables 18/8								Soudage de fils en croix			
e	D	H	L	Effort de pression	Intensité du courant	Temps de soudage	\varnothing du point soudé	e	D	H	L	Effort de pression	Intensité du courant	Temps de soudage	\varnothing du point soudé	\varnothing	Effort de pression	Intensité du courant	Temps de soudage
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(A)	(s)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(A)	(s)	(mm)	(mm)	(N)	(A)	(s)
0,5	1,75	0,5	4	1 150	4 800	0,16	3,5	0,5	1,75	0,5	4	2 000	4 000	0,16	3,5	1	600	600	0,04
0,8	2,5	0,6	5,5	1 850	6 700	0,24	4,3	0,8	2,5	0,6	5,5	3 200	5 600	0,24	4,3	2	1 000	1 200	0,08
1	3	0,7	7	2 300	8 000	0,26	4,5	1	3	0,7	7	4 000	6 600	0,26	4,5	3	1 400	2 000	0,12
1,5	4	0,9	9,5	3 500	11 000	0,36	5,7	1,5	4	0,9	9,5	6 000	9 000	0,36	5,7	4	2 000	2 900	0,16
2	4,75	1	11	4 650	13 000	0,42	7	2	4,75	1	11	8 000	11 000	0,42	7	6	2 800	5 000	0,30
2,5	5,5	1	12,5	5 800	14 500	0,46	9	2,5	5,5	1	12,5	10 000	12 500	0,46	9	8	3 800	7 500	0,42
3	7	1,5	17,5	7 000	16 500	0,48	11	3	7	1,5	17,5	12 000	14 000	0,48	11	12	6 000	14 000	0,74



5. Soudage en bout par étincelage

5.1 Principe

Le procédé de soudage en bout, première forme du soudage par résistance, permet, comme son nom l'indique, de souder bout à bout des barres ou des profilés de même section droite ou des pièces ayant reçu une préparation les ramenant à ce cas. Sur la figure 21 est représentée une opération de soudage en bout. Les pièces sont placées dans des mâchoires en cuivre, dont l'une est fixée sur un chariot mobile en translation parallèlement à l'axe de soudage.

L'opérateur actionne la commande du cycle qui se déroule automatiquement de la façon suivante :

■ **avance et accostage** : le chariot mobile entre en mouvement pour rapprocher les pièces qui viennent en contact sous un effort déterminé ;

■ **soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire du circuit de puissance, et porte les parties en contact à la température de soudage ;

■ **forgeage ou maintien** : exercé par l'effort du chariot mobile et à la fin duquel les mâchoires s'ouvrent en permettant le retour au repos du chariot.

Comme dans le cas général, ces différentes opérations sont temporisées. Il n'existe pas, dans les machines en bout, de marche à la volée semblable au soudage par points. Cependant, avec un dispositif de chargement et déchargement automatiques des pièces, on peut obtenir un fonctionnement similaire.

La description précédente concerne un mode opératoire qui se limite en pratique au soudage de pièces de très petites sections, ne dépassant pas quelques dizaines de millimètres carrés.

Lorsqu'il s'agit de pièces massives, pour lesquelles il n'est pas possible d'obtenir une portée parfaite des surfaces en regard, la répartition du courant très imparfaite ne permet pas d'engager directement un processus d'échauffement régulier et utilisable ; aussi a-t-on recours à un artifice, consistant à produire des étincelles de

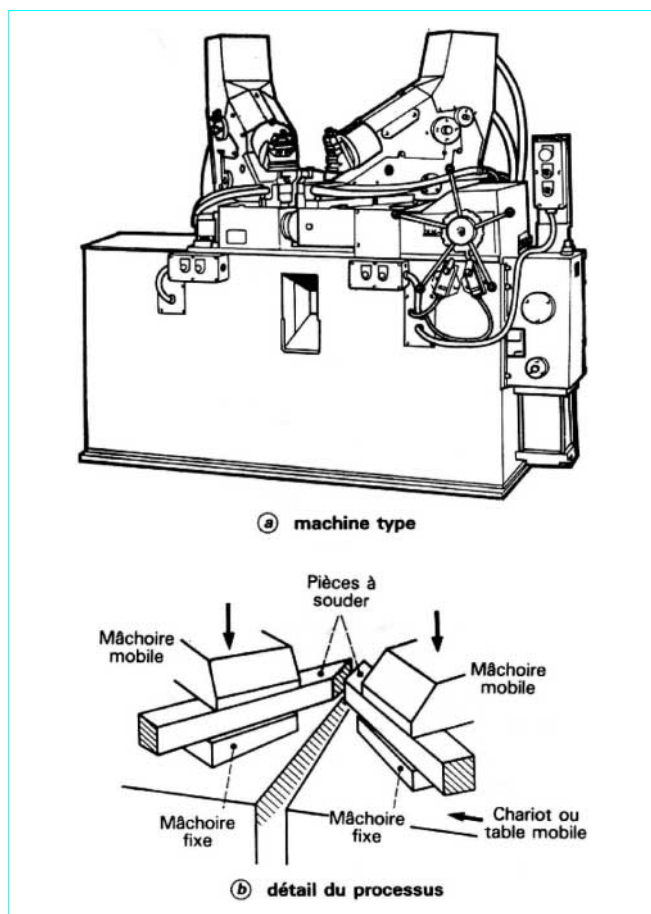


Figure 21 – Soudage en bout

contact, dont l'intérêt est de créer un échauffement parfaitement réparti sans exiger de densité de courant exagérée. Le procédé est alors appelé, pour cette raison, **soudage en bout par étincelage** ou plus simplement soudage par étincelage et c'est sous cette forme qu'il est généralisé. Il permet de souder des sections de $10\,000\text{ mm}^2$.

5.2 Formation de la soudure

La figure 22 représente, par une suite de graphiques, les phénomènes élémentaires du soudage par étincelage et leur répercussion sur l'intensité et la tension secondaires de la machine.

Au départ du soudage, les deux faces sont écartées l'une de l'autre de sorte que, lorsque le contacteur primaire se ferme, il ne passe aucun courant et la tension à vide du générateur (transformateur) apparaît entre les extrémités des pièces. Cette tension est de l'ordre de quelques volts.

On actionne le système d'avance de la mâchoire mobile et les pièces viennent en contact par l'une de leurs aspérités, fermant alors la boucle secondaire où un courant s'établit. Ce courant a, au point de contact, une telle densité qu'il y crée une élévation très rapide de la température. Il se forme un petit **pont liquide** qui finit par exploser sous forme d'étincelles incandescentes.

Le contact électrique est rompu avec formation d'un minuscule arc.

Par l'avance continue de la mâchoire mobile, ce phénomène élémentaire, qui n'a duré que quelques millisecondes, se multiplie un peu partout dans l'interface, au gré de la formation de nouveaux

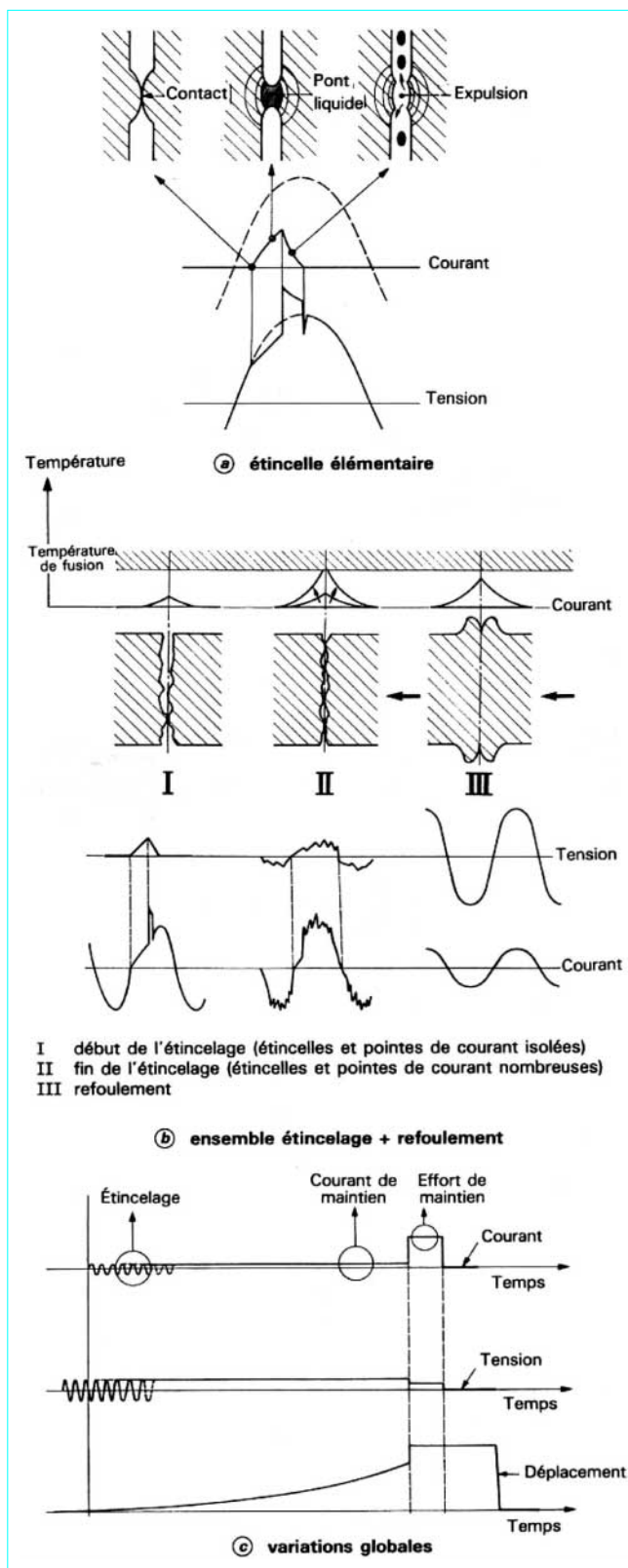


Figure 22 – Soudage en bout : formation de la soudure par étincelage en courant alternatif

contacts et avec une fréquence croissante, créant autant d'étincelles dans l'espace environnant. À la condition que la vitesse d'avance soit suffisante, il s'établit un régime stable dit *étincelage*, qui constitue une source de chaleur statistiquement répartie, fonctionnant à une température moyenne voisine de la température de fusion du matériau.

Les parties adjacentes s'échauffent alors progressivement par le flux de chaleur ainsi produit, suivant une loi globalement exponentielle.

Au bout d'un temps t_1 , on applique brusquement sur la pièce mobile l'effort de forgeage, qui a pour effet :

- de rapprocher brutalement les deux pièces ;
- de stopper l'étincelage ;
- d'expulser vers l'extérieur une partie de la matière qui, à la température atteinte, flue sous la poussée en formant un **bourrelet** ;
- de fermer le circuit secondaire sur toute la section, le courant prenant alors son régime permanent avec une intensité élevée.

Au temps t_2 , on interrompt le courant ; la zone affectée par la chaleur se refroidit, tandis que l'on maintient l'effort. La liaison est réalisée. Dans cette action appelée **refoulement**, le métal en fusion ayant subi l'action de l'air se trouve rejeté à l'extérieur, laissant une liaison métallurgiquement saine.

5.3 Paramètres du soudage par étincelage

La section à souder est imposée par la géométrie des pièces et devient une donnée du problème, au même titre que l'épaisseur des tôles pour le soudage par points.

Les paramètres sont alors les suivants :

- le courant d'étincelage ;
- la vitesse d'étincelage ;
- le temps d'étincelage.

La quantité de métal consommée est une résultante du processus.

5.3.1 Courant d'étincelage

Lors d'un contact élémentaire, le courant, initialement nul, suit un régime transitoire du type :

$$i = I_M \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right]$$

avec R/L constante de temps du circuit électrique de résistance R et d'inductance L .

Or, deux conditions sont à remplir sur le courant :

- il doit croître très vite lors de la formation d'un pont liquide ;
- il doit suivre l'élargissement du pont liquide dû au rapprochement et aux dilatations en conservant une densité constante.

Ces conditions nécessitent d'opérer pour ce qui concerne le transformateur à *tension constante*, c'est-à-dire avec une caractéristique externe *plate* et avec une inductance globale la plus faible possible (figure 23). Dans ces conditions, l'intensité du courant dans le pont liquide est proportionnelle à la tension secondaire qui devient ainsi le paramètre électrique de l'étincelage et l'on peut écrire :

$$i = U/(\rho \ell)$$

avec i densité du courant,

ρ résistivité du métal,

U tension aux extrémités du pont de longueur ℓ .

Toutes choses égales par ailleurs, il y a intérêt à conserver le plus longtemps possible un pont liquide à l'état chaud avant l'explosion, car c'est pendant ce temps qu'il fournit de la chaleur aux parties adjacentes.

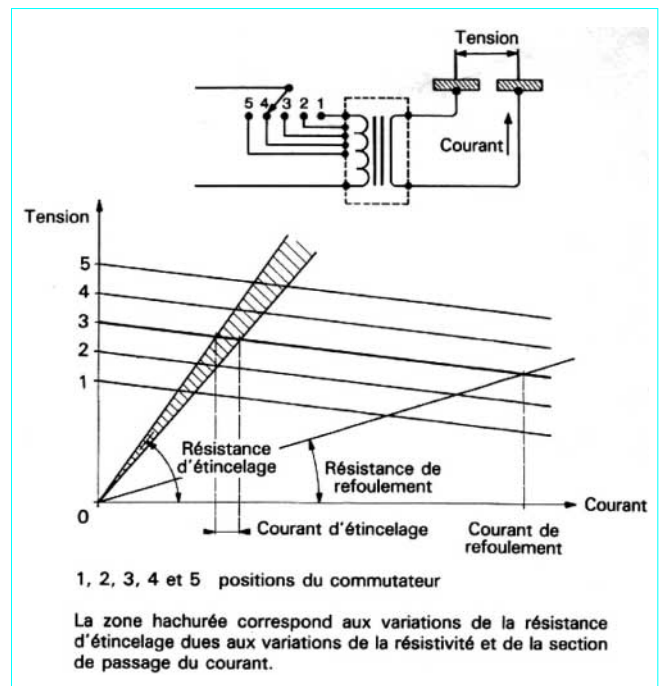


Figure 23 – Soudage en bout : caractéristiques d'un générateur de machine à souder

Une densité de courant trop élevée donne lieu à une explosion prématurée ; les étincelles sont fines et blanches et l'étincelage très haché. La chauffe est faible.

Une densité de courant insuffisante donne lieu à une montée en température trop lente et à un flux de chaleur insuffisant. À la limite, il n'y a plus étincelage mais *collage*, car le processus n'est pas amorcé.

Cela fixe la tension que doit fournir en charge le générateur, et qui détermine la densité de courant.

5.3.2 Vitesse d'étincelage

À tension donnée, le nombre de ponts qui vont se former pendant l'unité de temps est croissant avec la vitesse. Le flux de chaleur étant proportionnel à la fréquence d'étincelage, on voit donc l'intérêt d'avoir la plus grande vitesse possible. Le courant croît également avec la vitesse. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, la température du métal adjacent s'élève, la température du pont liquide élémentaire atteint plus vite la valeur finale et l'explosion se produit plus tôt. La fréquence d'étincelage doit alors augmenter pour compenser la diminution d'efficacité qui s'en suivrait. Cela est obtenu par augmentation progressive de la vitesse d'avance. La fonction *avance* est donc une véritable loi à allure croissante qui détermine, en définitive, pour une tension donnée, la puissance absorbée par la machine.

5.3.3 Temps d'étincelage

Le temps d'étincelage doit être suffisant pour laisser la chaleur produite diffuser convenablement à l'intérieur des pièces. Il est important que le gradient longitudinal de température ne soit pas trop fort, car cela entraînerait une diminution de la qualité de la soudure par un refroidissement trop rapide lors du refoulement.

Le temps d'étincelage détermine pratiquement la consommation de métal et l'écartement initial des mors de serrage.

5.3.4 Effort de refoulement

Il a le même effet que dans les autres procédés. Dans le soudage en bout par étincelage, il entraîne une nouvelle consommation de métal due au fluage qu'il occasionne sur la matière chaude.

La valeur de l'effort de refoulement est déterminée par les caractéristiques du métal à souder.

D'une manière générale, les machines à souder par étincelage sont équipées de vérins pneumatiques qui fournissent l'effort de refoulement dont on connaît la valeur.

Dans les machines de faible capacité et pour des raisons de simplicité technologique, le refoulement s'effectue par le système à came qui commande l'étincelage. Certains dispositifs soumettent la vitesse d'étincelage à une régulation fonction de la puissance absorbée.

5.3.5 Préchauffage

Lorsque les sections à souder dépassent 5 000 mm², le processus d'étincelage devient très long et très difficile, voire impossible à établir sur toute la section des pièces froides. On a remarqué, par contre, que cette difficulté disparaissait à partir d'une certaine température, d'où l'idée d'effectuer un préchauffage par effet Joule. On approche alors au début de l'opération, sous un effort suffisant pour éviter les étincelles, les deux pièces l'une contre l'autre, puis on fait passer le courant. La température s'élève progressivement, intéressant bientôt toute la masse.

Il suffit d'écarter légèrement les pièces pour que l'étincelage s'établisse d'une manière stable.

L'opération de préchauffage peut durer, dans les cas extrêmes, plusieurs minutes.

5.4 Modes de soudage en bout

On distingue :

- le soudage bout à bout proprement dit, qui a servi à en expliquer le fonctionnement ;
- le soudage d'onglet ;
- le soudage en T.

Le soudage bout à bout peut s'effectuer simultanément sur deux sections distinctes. C'est ainsi qu'il permet la réalisation d'anneaux de forte section pour la fabrication de chaînes.

On peut réaliser la fermeture d'anneaux de grands diamètres par une seule liaison. C'est le cas des jantes de voitures. Il se produit une dérivation de courant dont on a à tenir compte et qui réduit la capacité de la machine.

Le soudage en T n'est possible que si les sections à souder sont faibles, afin que l'étincelage soit très bref. Les soudures obtenues ne sont pas de bonne qualité.

5.5 Caractéristiques des assemblages en bout

5.5.1 Critères

Les critères des soudures en bout sont les suivants :

■ géométriques (figure 24) :

- alignement angulaire des pièces,
- décalage transversal,
- importance du bourrelet,
- déformation locale ;

■ métallurgiques :

- structure des différentes zones,
- absence de défauts,
- duretés (figure 25) ;

■ mécaniques :

- résistances à la traction et à la flexion.

5.5.2 Applications

Le soudage en bout peut s'accommoder de toutes les formes de sections, dans la mesure où il est possible de mettre en œuvre des serrages et des amenées de courant satisfaisants (figure 26). Ainsi les profilés creux rencontrés en menuiserie métallique peuvent présenter des difficultés de ce point de vue.

Les pièces forgées à surface rugueuse peuvent nécessiter des usinages préalables.

5.5.3 Paramètres

Le tableau 4 donne les conditions de réglage en soudage en bout pour divers types de pièces.

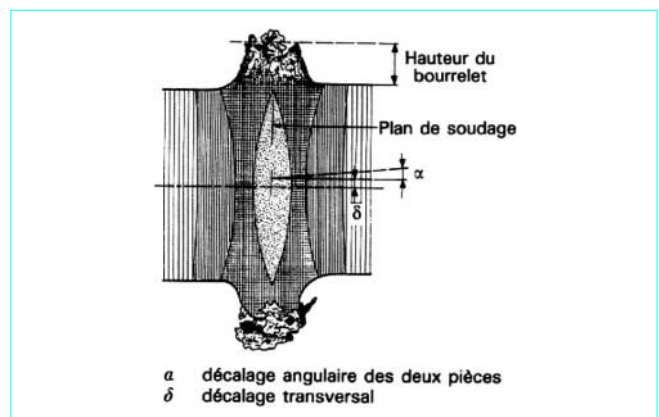
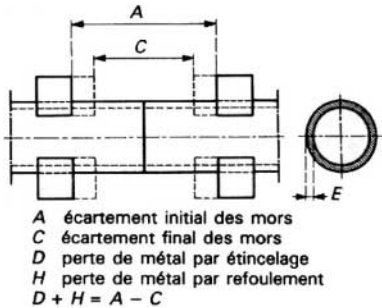


Figure 24 – Soudage en bout : coupe d'une soudure

Tableau 4 – Soudage en bout : conditions de réglage

Aciers doux						 <p> A écartement initial des mors C écartement final des mors D perte de métal par étincelage H perte de métal par refoulement $D + H = A - C$ </p>					
Section (mm ²)	Tension étincelage (V)	Courant (A)	Puissance branchement (kVA)	Puissance maximale (kVA)	Effort de refoulement (N)						
500	5,3	15 000	20	50	40 000						
1 000	6,2	25 000	40	120	80 000						
2 000	7,8	35 000	100	320	160 000						
4 000	10,3	47 500	200	600	320 000						
8 000	13,6	55 000	300	1 260	640 000						
Tubes ou feuillards						Barres rondes					
E (mm)	A (mm)	C (mm)	D (mm)	H (mm)	Temps d'étincelage (s)	Diamètre extérieur (mm)	A (mm)	C (mm)	D (mm)	H (mm)	Temps d'étincelage (s)
0,5	5,5	2,5	2,1	0,9	0,8	10	17,4	10,2	5,2	2	3,25
1	11	5	4,3	1,7	1,75	12	20	12	6	2	3,8
1,5	16	7,6	6,1	2,3	2,75	14	24	14	7,2	2,8	5
2	20	9	8	3	4	15	26	15	8	3	5,5
3	29	13,5	11,2	4,3	6,25	18	30	18	8,7	3,3	7,5
5	44	21,2	16,5	6,3	12	20	34	20,3	10,1	3,6	9

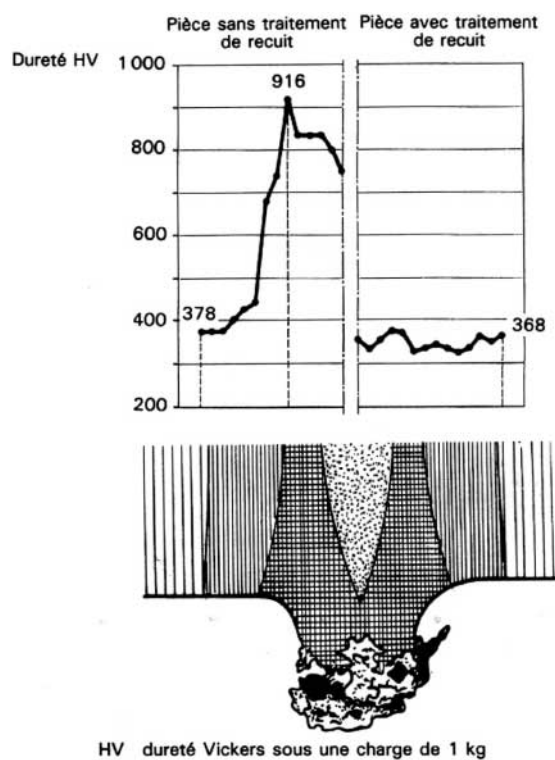


Figure 25 – Soudage en bout : dureté d'une soudure

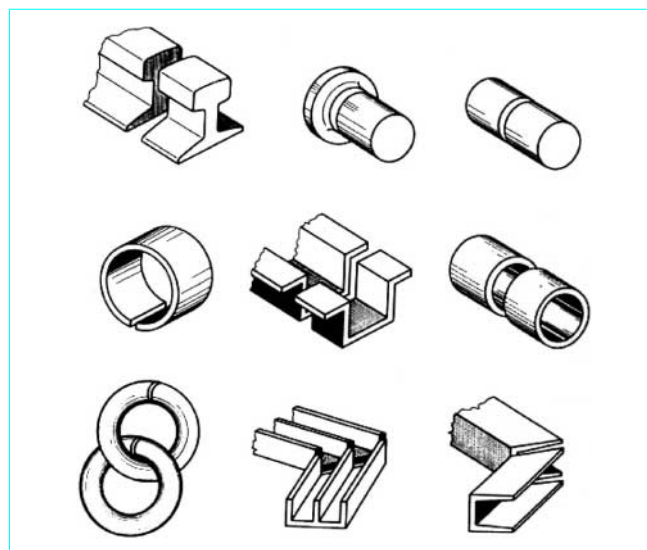


Figure 26 – Soudage en bout : assemblages typiques