

3 Le soudage en phase liquide

La plupart des procédés de soudage en phase liquide ont été développés depuis la fin du XIX^e siècle puisque avant on ne disposait pas de moyens pour focaliser l'énergie de manière à faire fondre les métaux localement. Avec la maîtrise de l'électricité, deux sources principales d'énergie ont été développées, c'est-à-dire: le chauffage par résistance utilisant l'effet Joule, et l'arc électrique. Ce dernier constitue la base pour les procédés de soudage les plus utilisés dans nos jours. À part ces deux sources, il existe encore des techniques où la chaleur est fournie par une réaction chimique—notamment la combustion d'un gaz ou le procédé d'aluminothermie—ou par interactions des rayons électroniques ou laser avec la matière.

Bien que les procédés passant par la phase liquide aient moins de restrictions que les procédés en phase solide au niveau géométrie et dimension des pièces à souder, ils ont d'autres limitations notamment au niveau métallurgique:

- les matériaux à souder doivent à peu près avoir la même température de fusion; donc la capacité de joindre des métaux dissemblables est assez limitée.
- tout effet d'un traitement thermique et les changements de comportement mécanique qui l'accompagnent sont anéantis dans la région fondue et les parties avoisinantes;
- à une température élevée, les interactions avec l'atmosphère sont plus fortes notamment l'acquisition ou la perte des interstitielles mais aussi la perte des éléments d'alliage de pression de gaz élevée, par exemple le zinc dans les alliages cuivreux. Dans le cas des aciers, c'est surtout la réaction préférentielle avec l'oxygène qui fait que certains éléments sont enrichis dans le laitier, notamment le manganèse, le silicium et le chrome.

Les différents procédés de soudage en phase liquide, leurs caractéristiques et leurs bases physiques sont présentés dans ce qui suit.

3.1 Soudage par arc électrique

3.1.1 Généralités

De nos jours, l'arc électrique est la source d'énergie la plus exploitée pour le soudage en phase liquide. Environ 70% des soudures sont faites par des procédés à base de l'arc électrique.

3.1.1.1 Principe de fonctionnement

Un champ électrique important entre deux électrodes provoque des transitions d'électrons d'une électrode à l'autre. Ceci se fait même avec des tensions assez basses (quelques dizaines de Volts) pourvu que les électrodes soient assez proches. La collision des électrons avec des molécules de gaz ionisent ces dernières entre les électrodes. Un gaz qui se constitue de telles particules chargées est nommé un plasma. Les particules chargées, donc les ions et les électrons, sont accélérées vers l'anode (électrons et ions négatifs) ou vers la cathode (ions positifs) d'où une polarisation dans l'arc, cf. figure 3.1a. Il y a donc un surplus de ions positifs devant la cathode et une surplus d'électrons devant l'anode qui attendent d'être neutralisés. Dans l'état d'équilibre, le taux de neutralisation et d'alimentation sont égaux, autrement dit, il y a un courant qui passe d'une électrode à l'autre: l'arc électrique est établi. Cet équilibre est caractérisé par une courbe de chute de tension comme celle-ci donnée en figure 3.1b. Sur cette courbe, il est

donc bien naturel de distinguer trois régions dans l'arc: La zone cathodique, la zone anodique et la colonne d'arc.

Dans la zone cathodique la chute de tension est de quelques volts (5-15V). Elle a une épaisseur de quelques dizaines de microns. Le champ électrique qui fait sortir les électrons de la cathode est donc d'environ 10^6 V/m. La zone anodique est encore plus mince que la zone cathodique ($<10 \mu\text{m}$). La chute de tension étant plus faible aussi (d'environ 3V), le champ électrique est aussi de l'ordre de 10^6 V/m.

L'arc est borné à ses deux extrémités à des points très restreints: la tache anodique (à l'anode) et la tache cathodique (à la cathode).

Dans la zone intermédiaire, la colonne d'arc proprement dite, les ions et les électrons sont accélérés et les températures montent à plusieurs milliers de degrés Kelvin, typiquement 5000 à 8000 dans certains cas à 20'000 même, en fonction de la nature des électrodes et du milieu entre les électrodes. La colonne d'arc en soi est neutre c'est à dire qu'il y a autant de charges négatives que positives. À cause du grand nombre de particules chargées et leur mobilité, la résistance électrique de la colonne d'arc est basse et donc le champ électrique dans la colonne est faible comparé aux champs électriques dans les zones tout près des électrodes. Ceci est le facteur clé de l'arc électrique, puisque la longueur de l'arc n'influence que faiblement la courbe de polarisation, ce qui assure que dans la zone anodique et cathodique le champ électrique reste le même, cf. figure 3.2.

Tenant compte de ce fait, on peut facilement comprendre comment un arc électrique est produit: Pour faire sortir les électrons de la cathode, il faut un champ électrique d'environ 10^6 V/m. Avec des tensions à vide de 25 à 50 V qui sont normalement utilisées, il faut donc approcher l'anode et la cathode à 25 à 50 μm . Puisque c'est assez difficile, on court-circuite les deux électrodes. Le courant qui passe chauffe le métal au point de contact jusqu'à l'évaporation. Les atomes métalliques sont ensuite ionisés et la polarisation du plasma peut s'établir: l'arc jaillit. Puis, les

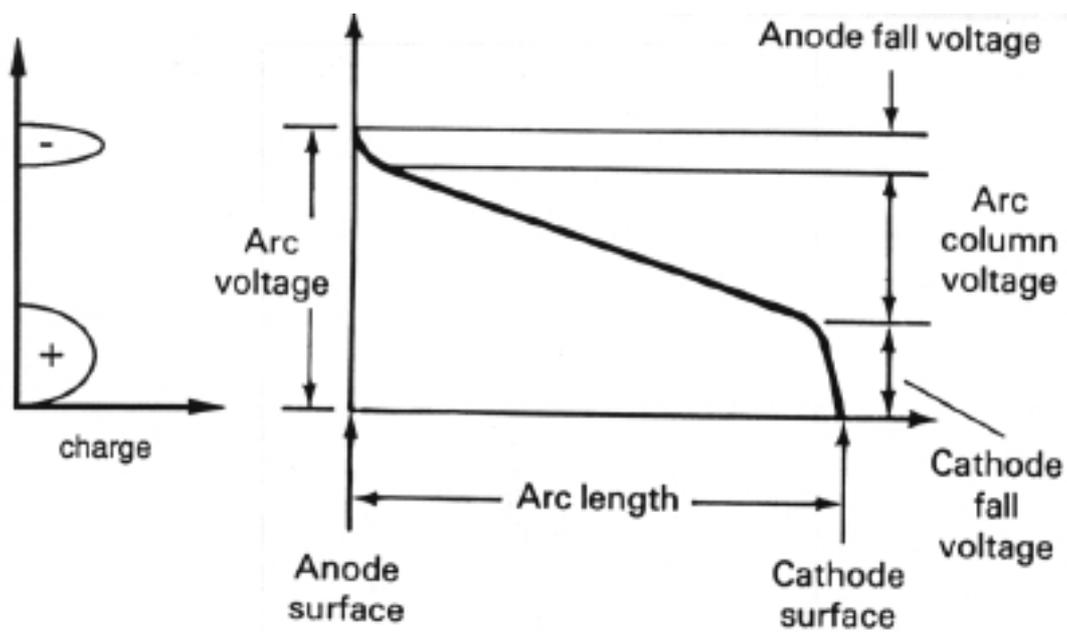


Fig. 3.1: a) la distribution des particules chargées dans l'arc électrique. Les particules positives sont concentrées devant la cathode, et les particules négatives se trouvent en majorité devant l'anode; b) évolution de la tension dans un arc électrique entre anode et cathode.

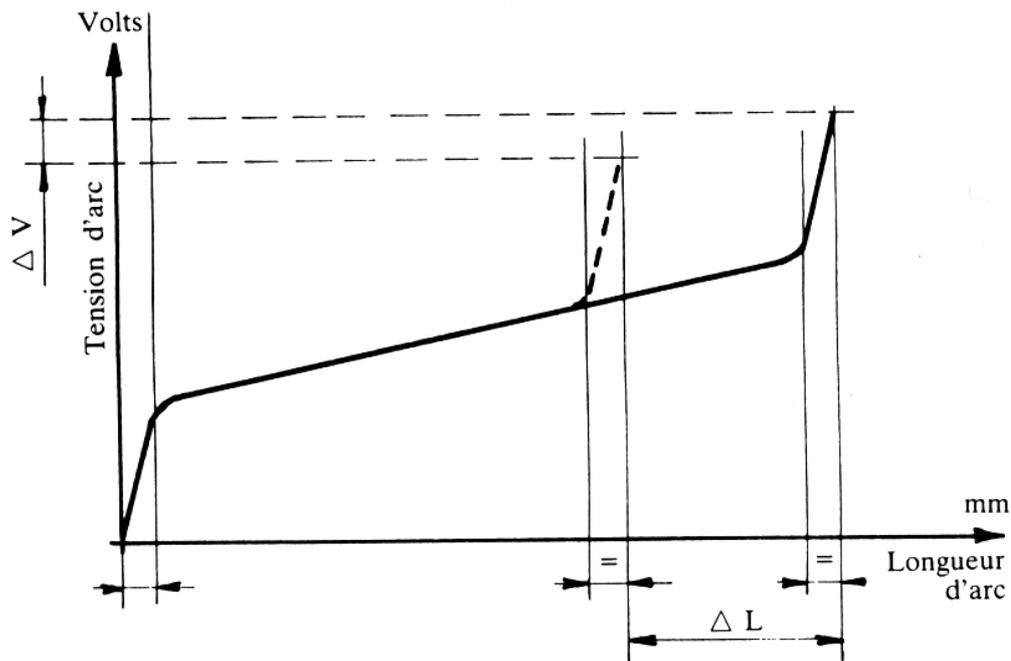


Fig. 3.2: Influence de la longueur de la colonne d'arc à la tension entre l'anode et la cathode: la longueur de la colonne (qui a une résistance faible par rapport aux zones près des électrodes) ne change que par peu la chute de la tension entre les électrodes.

électrodes sont éloignées à leur distance de travail. Comme on verra plus tard, il existe aussi d'autres façons d'amorcer l'arc, à savoir de souffler un arc pilote vers la pièce à souder (voir la section soudage par plasma, Chap. 3.1.2.5) ou un amorçage haute fréquence (en cas de soudage T.I.G pour ne pas contaminer la soudure avec du tungstène) aussi bien que par décharge d'un condensateur.

Dans les procédés de soudage, une des deux électrodes est normalement la (ou les) pièce(s) à souder. L'autre électrode peut être un fil fusible qui est en même temps le métal d'apport ou une pièce de métal réfractaire à point de fusion élevé (souvent le tungstène) non-fusible. L'électrode fusible est amenée automatiquement ou à la main. La température à la pointe de l'électrode est dans l'ordre de 3000 K pour la cathode et 4000 K pour l'anode, la différence provenant surtout du fait qu'il y a un flux net d'électrons de la cathode vers l'anode qui fait que l'énergie produite par le bombardement, la neutralisation des ions et l'intégration des électrons du plasma est plus haute à l'anode qu'à la cathode.

3.1.1.2 Transfert du métal

Dans le cas d'électrode fusible, le métal fondu de l'électrode doit être transféré au bain de fusion. Pour cela, il y a différents modes, à savoir:

- Transfert globulaire: le fil électrode étant l'anode, les petits gouttes sont retenues par des forces de surface au fil tandis que des grands gouttes se libèrent par force gravitationnelle.
- transfert par pulvérisation axiale: le courant d'électrons sortant de la cathode et les forces électromagnétiques et hydrodynamique libèrent des petits gouttes de métal qui sont transférées dans le bain de fusion.

- transfert par court-circuit: le procédé d'amorçage, donc le court-circuit, est constamment répété, et l'arc est périodiquement rétabli lorsque les ponts de métal liquide se vaporisent.

Le transfert par court-circuit s'impose lorsqu'il est question de souder contre la gravité, la taille des gouttes étant de sortes que les tensions de surface sont plus fortes que les forces gravitationnelles. Ces modes de transfert sont fortement fonction du courant de soudage; cette dépendance est schématisée en figure 3.3 en combinaison avec les conditions de courant respectif. On voit également que la fonction entre courant et tension de soudage ne passe pas par l'origine ce qui est dû à la chute de tension devant la cathode et l'anode qui les deux ne sont pas fonction du courant qui passe.

3.1.1.3 Le courant de soudage

L'intensité du courant de soudage a donc une influence sur le transfert du métal fondu de l'électrode fusible au bain de fusion. Il y a cependant des caractéristiques du courant qui sont encore plus importantes que l'intensité notamment le type de courant (alternatif ou continu) et—en cas de courant continu—sa polarité.

Courant alternatif ou continu

Comme on l'a vu plus haut, l'arc reste seulement établi si la chute de tension entre l'anode et la cathode est au moins la somme de chute anodique et cathodique. Le courant continu a donc l'avantage par rapport au courant alternatif que la tension reste constamment à un niveau élevé, tandis qu'en cas de courant alternatif, on passe deux fois par zéro par période et pour un certain temps la tension est trop basse pour rétablir l'arc. Les électrodes peuvent donc se refroidir et le

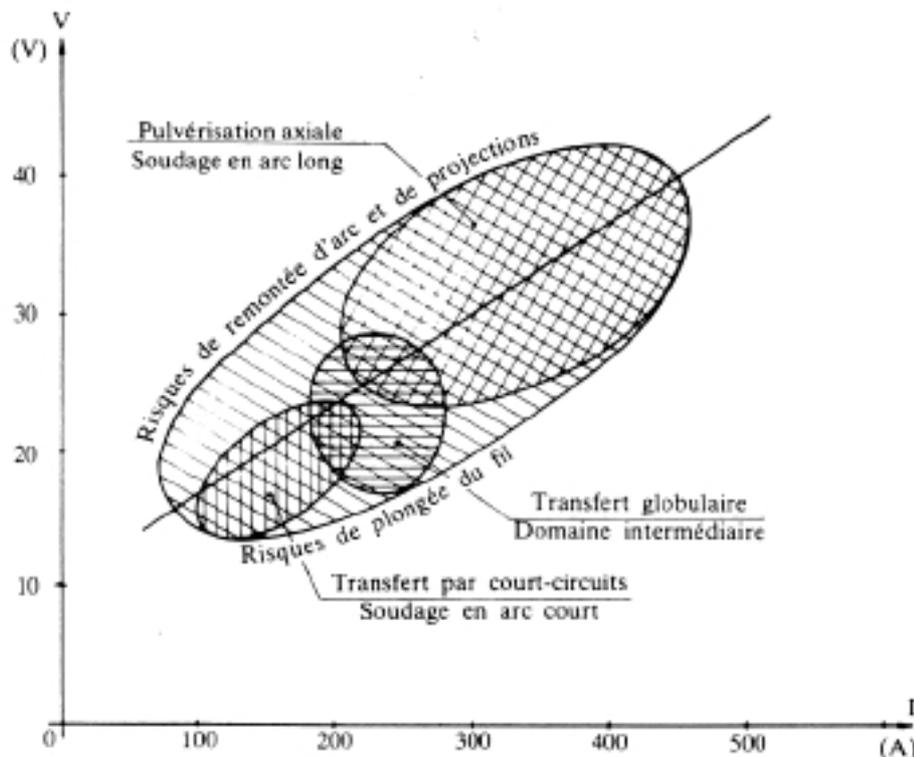


Fig. 3.3: Les modes différents de transfert du métal fondu du fil électrode au bain de fusion en fonction de courant et de tension de soudage (de faibles à forts courants): transfert par court circuit, transfert globulaire, et pulvérisation axiale.

point où l'arc est amorcé de nouveau n'est pas forcément le même ou il était avant le passage par zéro, d'où un arc mouvant. En outre, la différence de température entre anode et cathode qui s'établit en courant continu n'est pas présente en cas de courant alternatif parce qu'il n'y a pas une anode et une cathode bien définie.

Par contre, le courant alternatif n'est pas soumis au soufflement d'arc qui intervient dans le courant continu dû à une prise de masse (au moment donné forcément) asymétrique qui produit des champs magnétiques qui agissent sur les particules chargées de l'arc. L'effet de la prise de masse électrique est présenté dans la figure 3.4. Cet effet se produit plus vigoureusement si l'intensité du courant est forte. Dans cette situation, l'arc est difficile à diriger, d'où l'inconvénient de l'employé dans un procédé automatisé.

La polarité en cas de courant continu

La polarité des électrodes en courant continu a un effet sur la forme du bain de fusion qui est d'une part engendré par la différence de température entre anode et cathode. Pour une électrode réfractaire, la pièce à souder est généralement l'anode. L'anode étant plus chaude que la cathode, la pointe de l'électrode réfractaire peut être assez fine sans fondre elle-même, ce qui conduit à un bain de fusion plus profond. Le cas où la pièce à souder est l'anode est nommé polarité directe.

Au contraire, si l'électrode réfractaire est l'anode—situation nommée polarité inverse—, elle devient plus chaude et peut même fondre à la pointe formant une pointe sphérique. La pointe agrandie de telle manière que l'électrode réfractaire et la tache cathodique mobile dans le bain de fusion font que la plage de chauffe est plus grande, d'où un apport de chaleur moins concentré. Le bain de fusion est donc assez large et pas tellement profond. Comme on verra plus tard, la forme du bain de fusion peut encore être sensiblement changée par d'autres mécanismes. Le cas d'un courant alternatif conduit à une situation intermédiaire comme démontrée en figure 3.5.

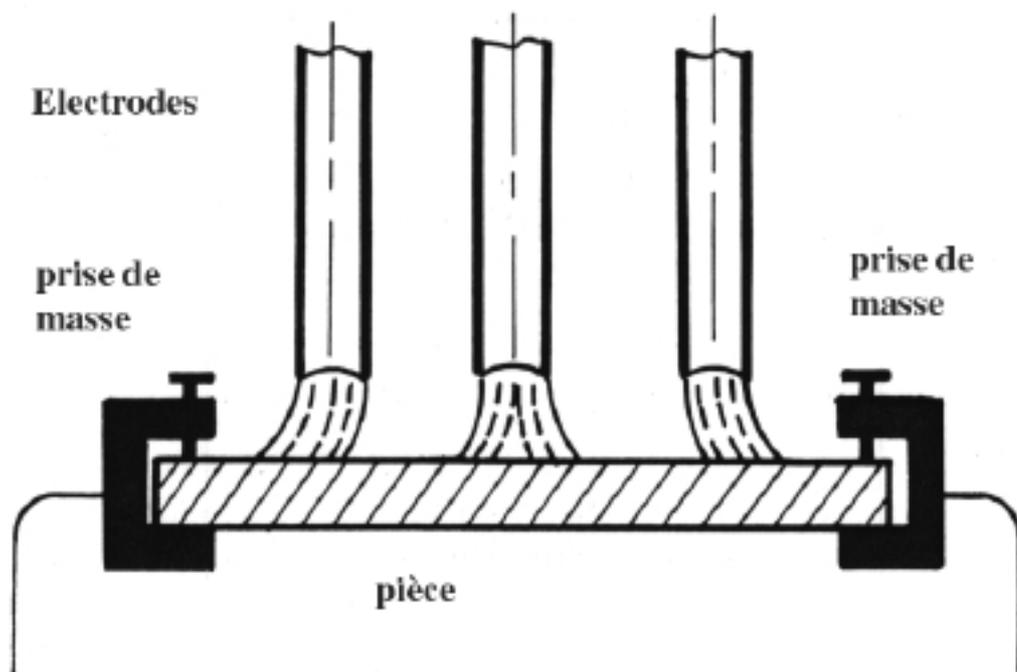


Fig. 3.4: Influence de la prise de masse sur le soufflement de l'arc en courant continu. Le problème peut être résolu en plaçant les masses aux deux extrémités de la soudure pour que l'arc soufflé reste dans le

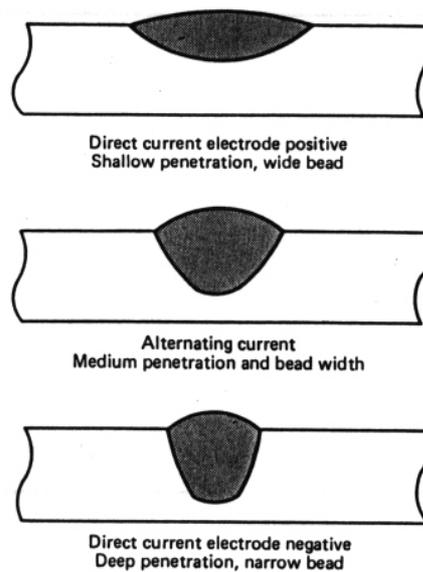


Fig. 3.5: Influence de la polarité de l'électrode réfractaire dans le procédé T.I.G. à la forme du bain de fusion: a) polarité inverse, b) courant alternatif et c) polarité directe.

La mobilité de la tache cathodique est néanmoins bénéfique: dans la tache cathodique le courant passe par une couche très mince d'oxyde à des intensités très élevées (10^{11} A/m²) qui détruit la tache cathodique après une fraction d'une micro-second par explosion (vaporisation de gaz métallique). Ensuite une autre tache cathodique est formée. L'avantage de ces explosions est que la couche d'oxyde est cassée ce qui est indispensable pour le soudage de l'aluminium par exemple. On parle d'une action nettoiyante de la polarité inverse.

Il est donc évident que pour avoir une combinaison de la grande profondeur du bain de fusion de la polarité directe et de l'action nettoiyante de la polarité inverse un courant de genre alternatif mais sans les désavantages d'un courant sinoïdal serait fort souhaitable. Voilà notre prochain sujet.

3.1.1.4 Les générateurs de courant de soudage

Les générateurs de courant utilisés pour le soudage fournissent dans la plupart des cas un courant continu. Ce courant continu est produit avec différentes techniques: Il existe le type redresseur qui change le courant alternatif fourni par le réseau $I_0 \sin t$ en $|I_0 \sin t|$. Pour lisser les ondulations, des condensateurs sont employés. Dans certains cas spéciaux, lorsque le courant et le temps de soudage sont limités, on utilise aussi des condensateurs comme source de courant continu, p. ex. dans le soudage des goujons. Un courant continu peut également être produit par un générateur basé sur le principe d'un moteur à courant continu inversé. Autrement dit, l'action redresseur est accomplie mécaniquement.

Pour le courant alternatif il existe deux types de générateurs (dans le sens large): l'alternateur qui est l'inverse d'un moteur à courant alternatif et le transformateur qui engendre un changement de tension et de courant en gardant la puissance essentiellement constante.

Une génération plus récente d'alimentation électrique se base sur la technologie des semi-conducteurs de haute puissance pour lesquelles la polarité, l'amplitude, et la fréquence de changement peuvent être choisis assez librement. Ces inverseurs permettent aussi de changer la

polarité très rapidement, ce qui facilite le ramorçage après avoir éteint l'arc en passant par un zéro de tension. En outre, on peut également choisir la répartition de temps entre polarité directe et inverse, ce qui mène à une optimisation entre action nettoyante, profondeur et taille de bain de fusion. Les caractéristiques de ces différentes sources de courant sont montrées en figure 3.6.

Les sources de courant sont caractérisées par deux paramètres: (i) la tension à vide, qui est la tension entre les deux bornes s'il n'y a pas de courant, donc si l'arc est éteint et (ii) leur caractéristique statique, c'est-à-dire, l'évolution de la tension si le courant varie. On peut distinguer généralement des générateurs à caractéristique *plongeante* ou *plate*. Les premiers ne changent que faiblement le courant lorsque la tension entre les électrodes est changée ce qui est le cas quand l'arc est allongé ou raccourci. Ce genre de générateurs est donc approprié quand la distance entre les électrodes peut changer sans que le courant et donc la température et le taux de déposition/fusion ne sont pas censés de changer. Ils sont donc utilisés dans le soudage à main (électrode enrobée, soudage T.I.G.) et dans les procédés automatisés où la vitesse du fil est réglée par la tension entre les électrodes.

Les sources à caractéristique plate augmentent sensiblement le courant quand l'arc est raccourci (qui correspond à une baisse de tension de soudage) et baissent le courant quand l'arc est allongé, fait qui les rend appropriées pour des procédés automatisés où l'électrode est fournie à vitesse constante, cf. aussi soudage M.I.G./M.A.G., Chap. 3.1.2.3.

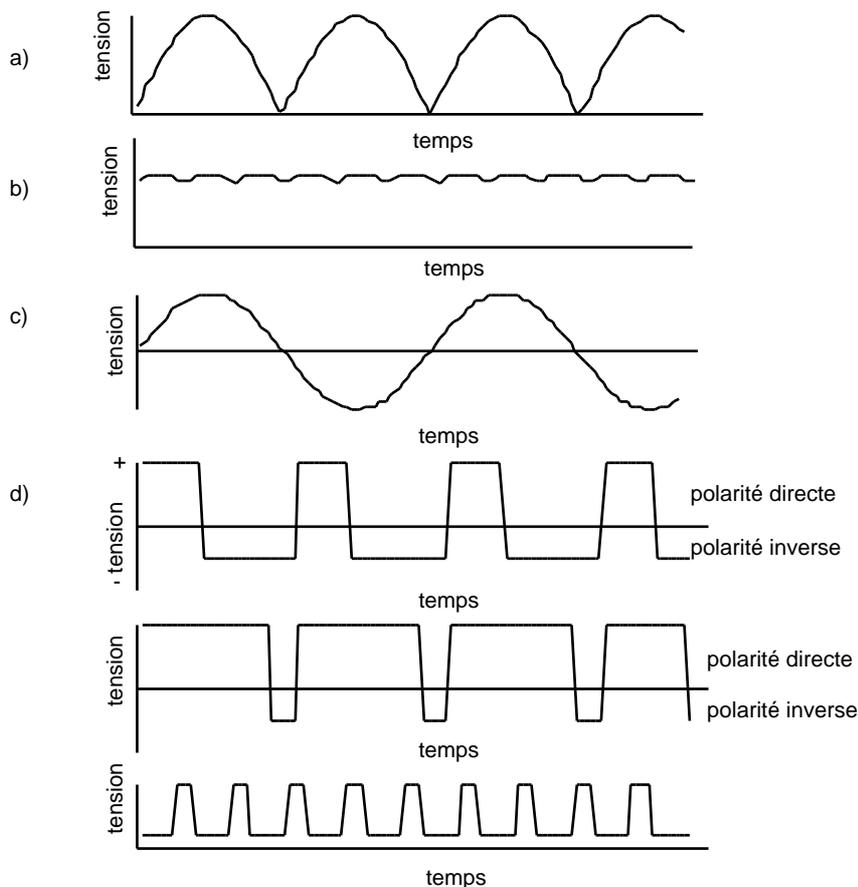


Fig. 3.6: Différents types de source de courant de soudage employés: a) redresseur monophasé et générateur b) redresseur triphasé c) alternateur et transformateur d) Inverseur (i) polarité équilibrée, (ii) optimisation de répartition de temps en polarité directe et inversé et (iii) courant continu pulsé.

3.1.1.5 Puissance de l'arc et énergie de soudage

La puissance nominale P_n pour exécuter une soudure est une caractéristique importante d'un procédé. Au cas où l'énergie est fournie par un courant électrique—donc dans la plupart des procédés de soudage passant par une phase liquide—la puissance est donnée par la loi d'Ohm:

$$P_n = UI$$

où U est la tension électrique entre les deux électrodes (et non la tension à vide) et I est l'intensité du courant. Il s'avère que l'énergie fournie n'est pas transmise entièrement à la soudure à cause des pertes par rayonnement, par convection et en cas du soudage T.I.G. par refroidissement de l'électrode réfractaire. Les pertes sont quantifiées par un facteur d'efficacité du système, le rendement η . La puissance efficace P_e qui peut être utilisée pour la fusion du métal est donnée par

$$P_e = \eta P_n$$

Le rendement η est fonction du procédé choisi et des paramètres comme la température et la longueur de l'arc (rayonnement), les métaux à souder (taux de réflexion), la forme et la fonction de l'électrode (enrobée ou pas, fusible ou non-fusible). Les rendements de différents procédés de soudage par l'arc électrique sont donnés en Tab. 3.1.

Supposons que la chaleur nécessaire pour faire avancer le bain de fusion par l a une certaine valeur constante, H . Il en suit qu'avec l'énergie disponible par unité des temps (la puissance efficace) on peut faire avancer le bain de fusion par un multiple de l , d'où la vitesse de soudage v donnée par

$$\frac{P_e}{H} = v$$

L'énergie H qui est fonction de la section du cordon est aussi nommée l'énergie de soudage. Elle a l'unité J/m qui vient du fait que c'est une énergie disponible pour une unité de longueur du cordon. La puissance efficace P_e limite donc le taux maximal de métal d'apport qui peut être fondu par seconde. Par contre, puisque H est fonction de la section du cordon, la vitesse de soudage pourrait être augmentée si la même puissance était introduite par une plage de chauffe plus petite ce qui limiterait aussi la section du cordon.

Procédés de soudage	Métaux	Rendement de l'arc (η)
Automatique sous flux solides	Aciers	0.90 à 0.99
A l'arc, avec électrodes enrobées	Aciers	0.70 à 0.85
M.I.G.	Acier doux	0.65 à 0.85
	Aluminium	0.70 à 0.85
T.I.G.		
courant alternatif	Acier doux	0.22 à 0.48
courant continu	acier doux	0.36 à 0.46
Courant alternatif	Aluminium	0.21 à 0.43

Tab. 3.1: Rendement η pour les différents procédés de soudage à l'arc. Les pertes sont dû au rayonnement, à la convection (soudage avec protection gazeuse) et refroidissement de l'électrode (soudage T.I.G.)

En figure 3.7, la puissance (en [kW]), et la densité de puissance (en [W/cm^2]) aussi bien que la plage de chauffe typique sont données pour plusieurs procédés de soudage en phase liquide. La diagonale vers le coin en haut à droite indique l'augmentation de puissance tandis que l'axe y indique la densité de puissance efficace, qui limite la vitesse de soudage. Pour donner une idée: environ $10^3 \text{ W}/\text{cm}^2$ sont nécessaire pour chauffer un métal à son point de fusion et au delà de $10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ tout métal est vaporisé. Il va de soi que ces valeurs sont indicatives et dépendent du point de fusion et de la diffusivité thermique d'un métal aussi bien que de sa température de base.

3.1.1.6 Le bain de fusion

Comme on l'a vu dans la discussion de l'énergie de soudage, l'énergie effective de l'arc et la vitesse de soudage définissent à peu près la section du cordon de soudure. Avec la supposition simplificatrice que le bain de fusion a une section rectangulaire, la même section peut être obtenue par plusieurs combinaisons de largeur et profondeur du bain de fusion. Le rapport entre profondeur et largeur du bain de fusion est caractéristique pour la soudure. La profondeur est parfois aussi nommée la pénétration. En fonction de la géométrie des pièces à souder, on veut bien varier la pénétration: pour une soudure entre deux tôles minces on souhaiterait une pénétration faible, tandis que pour une soudure bout à bout de deux pièces épaisses, on

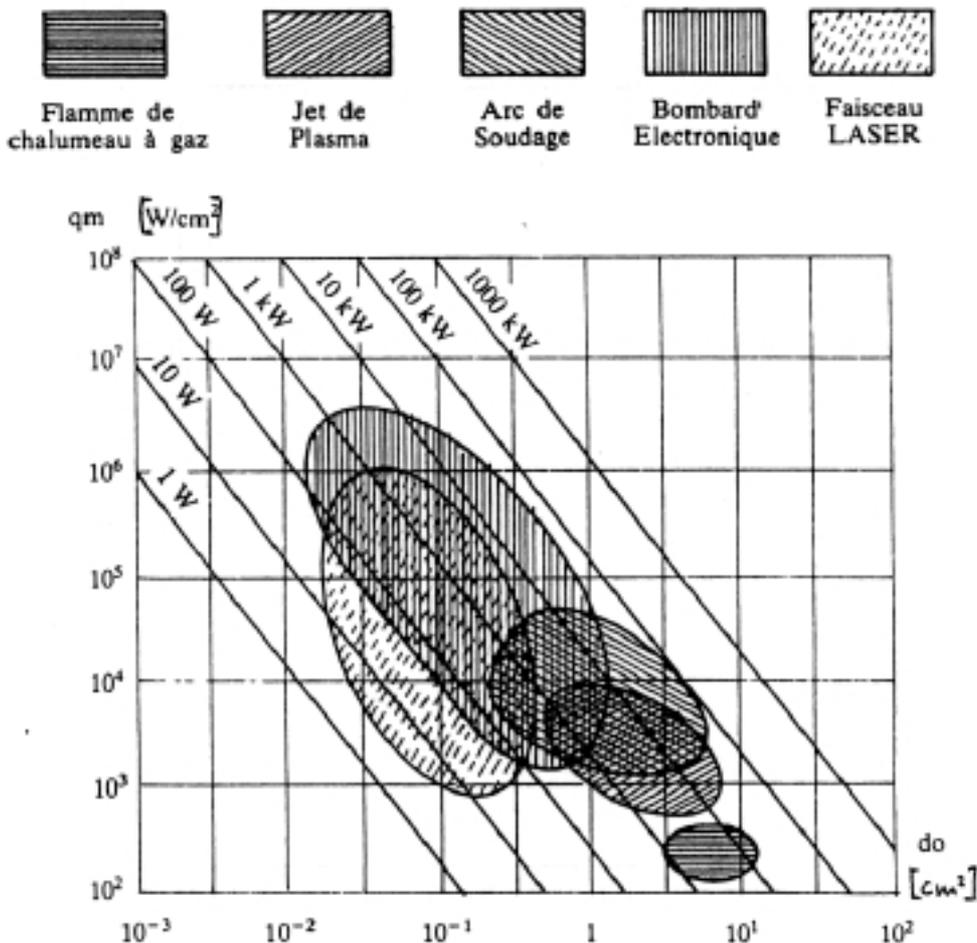


Fig. 3.7: Puissance et densité de puissance pour différents procédés de soudage en phase liquide. Le soudage à l'arc permet un taux de renforcement (ajoute de matière) élevé tandis que les plus grandes vitesses sont atteintes avec les procédés basé sur l'énergie focalisé, donc le soudage par laser et par

préférerait une pénétration forte pour établir le joint avec le moins de passes possible. De toute façon il est impératif d'avoir une pénétration bien définie et reproductible. Comme on verra plus tard, la conductivité thermique du gaz protecteur a un certain effet sur la largeur du bain de fusion. De même, le diamètre du fil électrode ou bien de l'électrode réfractaire et l'angle d'ouverture de cette dernière ont un effet sur la pénétration, cf. figure 3.8. En outre, on a touché à l'influence de la polarité sur la pénétration. Dans ce qui suit, encore quelques autres effets sont présentés.

De manière générale, la forme du bain de fusion est influencée par la conduction de chaleur et par la convection de chaleur. Il s'avère que pour le soudage, c'est surtout la convection du métal liquide qui contrôle la pénétration. Il existe plusieurs effets qui conduisent à la convection: les gradients de tension de surface, les forces électromagnétiques et les forces aérodynamiques.

A la surface du bain, il y a un gradient de température du centre aux bords. Ceci se transforme dans les métaux purs en gradient de tension de surface, car la tension de surface diminue en augmentant la température. Ce gradient d'énergie de surface engendre un transport de métal à la surface du centre vers les bords. En même temps, le métal aux bords est transporté au centre au fond du bain de fusion. Les bords sont donc constamment chauffés par le métal chaud venant du centre d'où un élargissement du bain de fusion: le bain de fusion a donc un rapport de profondeur à largeur faible (typiquement < 0.2), cf. fig. 3.9a.

En revanche, si le bain de fusion contient des éléments allant à la surface (qui ainsi diminuent la tension de surface), tels que le soufre, le tellure, le sélénium et l'oxygène, leur stabilité à la surface est diminuée en augmentant la température, donc leur effet de diminuer la tension de surface est affaibli à plus haute température, cf. Fig. 3.10. Au bord du bain de fusion, la tension de surface est donc plus basse qu'au centre d'où une inversion de la convection. Le métal chauffé par l'arc au centre du bain de fusion va vers le fond du bain et l'approfondit, cf. fig. 3.9b. Le rapport de profondeur à la largeur va jusqu'à 0.5.

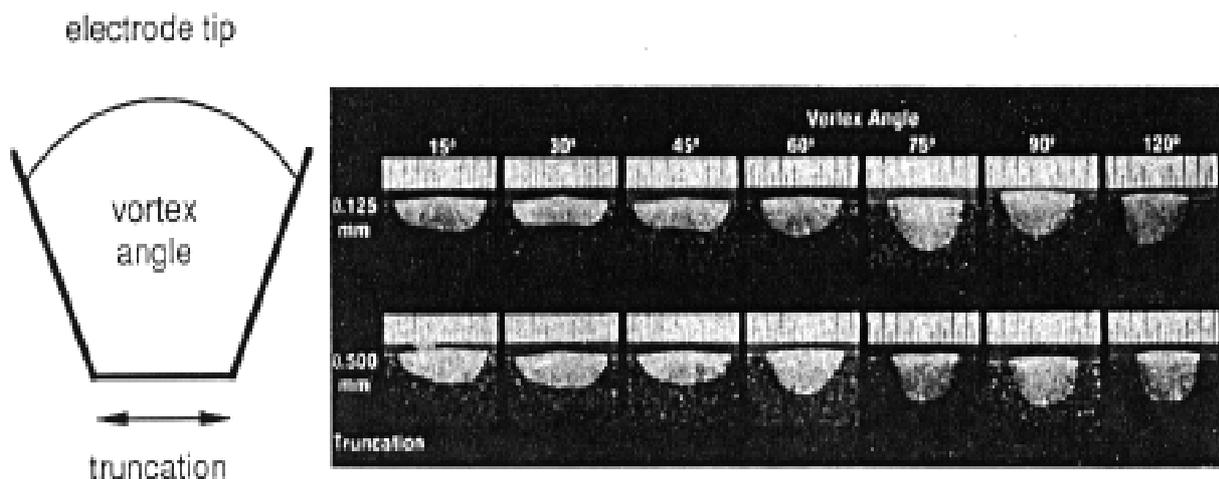


Fig. 3.8: Influence de la géométrie de la pointe de l'électrode réfractaire dans le soudage T.I.G. Le plus large l'angle d'ouverture de l'électrode le plus forte la pénétration.

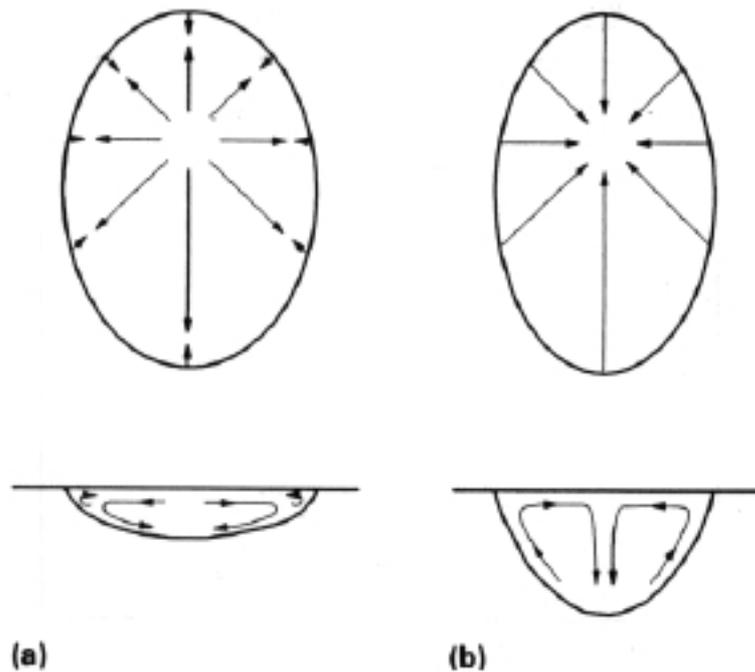


Fig. 3.9: L'influence d'un gradient de tension de surface sur la direction de convection dans un métal liquide: a) la tension de surface étant plus haute au bord du bain de fusion, la convection va du centre au bord apportant le métal chaud et donc la chaleur aux bords; b) cas inverse de tension de surface étant plus haut au centre qu'aux bords; il en suit une convection vers le fond du bain de fusion.

Ce phénomène de direction de convection en fonction du gradient de tension de surface est connu sous le nom d'effet de Marangoni. La pénétration peut donc être contrôlée par le taux d'impureté changeant la tension de surface. Afin de l'augmenter on ajoute du sulfure (<200 ppm) ou d'oxygène (<500 ppm). De plus grandes additions d'oxygène ont un effet inverse tandis que pour le sulfure on atteint un plateau de pénétration. L'oxygène est ajouté en

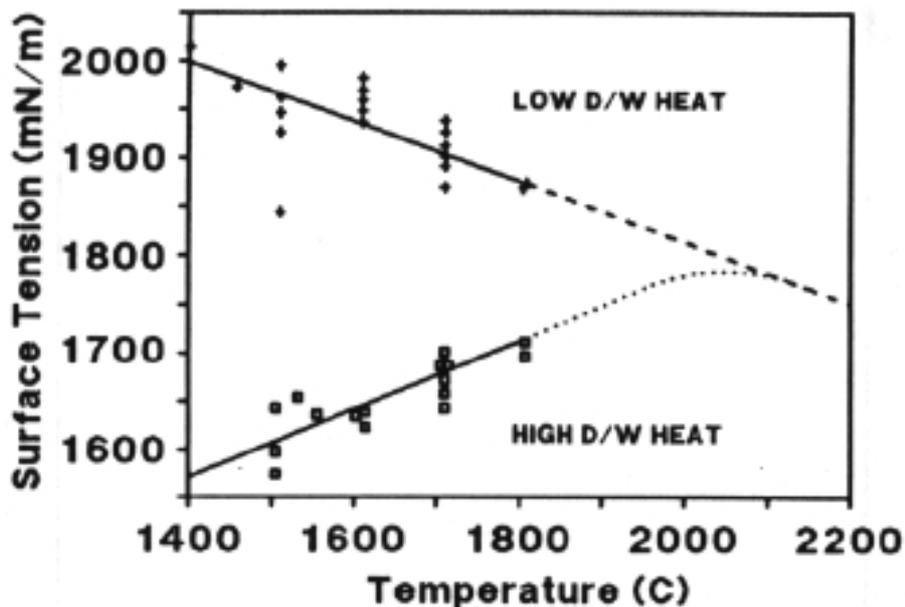


Fig. 3.10: Evolution de la tension de surface en fonction de température pour un métal pur et pour un métal contenant des éléments allant à la surface. Si la température augmente l'activité de ces éléments

oxydant la surface avant de souder ou bien comme élément d'alliage dans l'électrode fusible. Pour diminuer la pénétration, on ajoute des traces d'aluminium ou de cérium qui les deux réagissent avec l'oxygène (et le dernier aussi avec le sulfure) formant des composants qui n'abaissent plus la tension de surface.

Les *forces électromagnétiques* sont le produit du champ magnétique induit par le courant et le courant même selon

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$$

Puisque le champ magnétique est proportionnel au courant, les forces électromagnétiques augmentent avec le carré du courant. Selon figure 3.11, elles agissent vers la profondeur du bain de fusion d'où une pénétration plus importante. A partir d'un certain courant, elles deviennent plus importantes que les effets dus aux gradients de tension de surface. Notons aussi que la direction des forces électromagnétiques ne dépend pas de la polarité du courant, elles sont donc aussi présentes en cas de courant alternatif.

Les forces aérodynamiques sont dues au fait que les particules chargées sont accélérées vers le bain de fusion où leur énergie cinétique se transforme dans une pression vers le bain de fusion. Les particules chargées entraînent également les molécules ou atomes non-chargées. On parle d'un jet de plasma. Le jet de plasma agit par deux mécanismes différents sur la forme du bain de fusion: (i) la surface du bain de fusion est enfoncée jusqu'à ce que la tension superficielle contre la pression du jet et (ii) le jet emporte le métal provenant de l'électrode fusible selon la viscosité cinématique—qui est le produit de la densité et de la viscosité—du gaz protecteur. Les deux effets approfondissent le bain de fusion. Le dernier effet intervient surtout dans le soudage M.I.G. protégé par l'argon, cf. fig. 3.12.

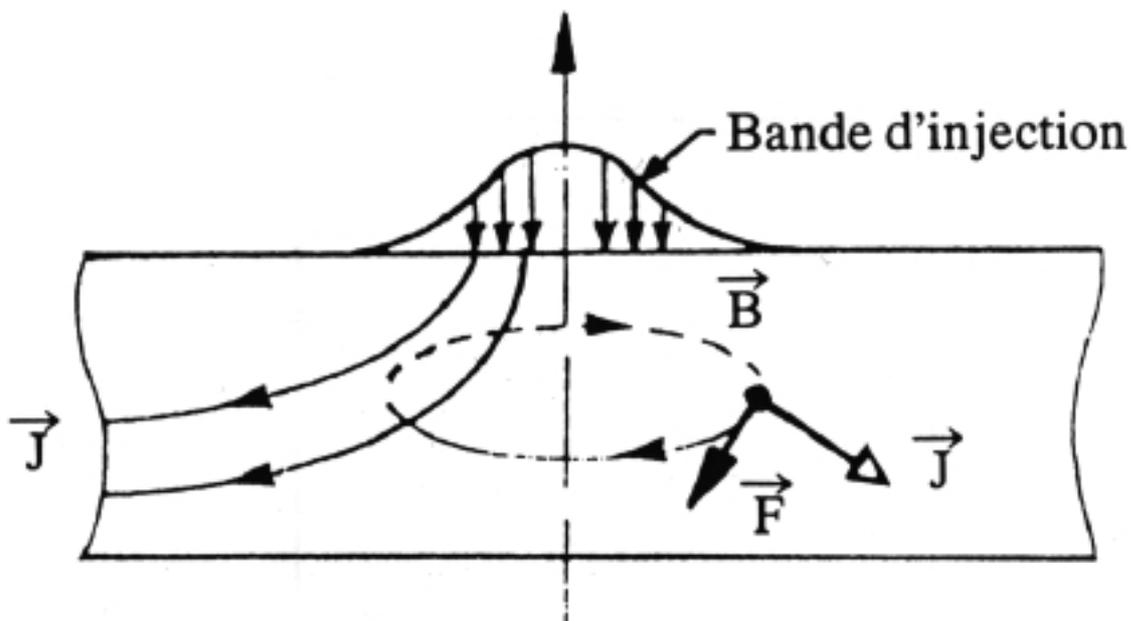


Fig. 3.11: Schéma de provenance de forces électromagnétiques dans l'arc et dans le bain de fusion. La charge est injectée au centre ; au moment qu'elle est déviée par la prise de masse, le vecteur de la force de Lorentz a une composante vers le fond du bain de fusion.

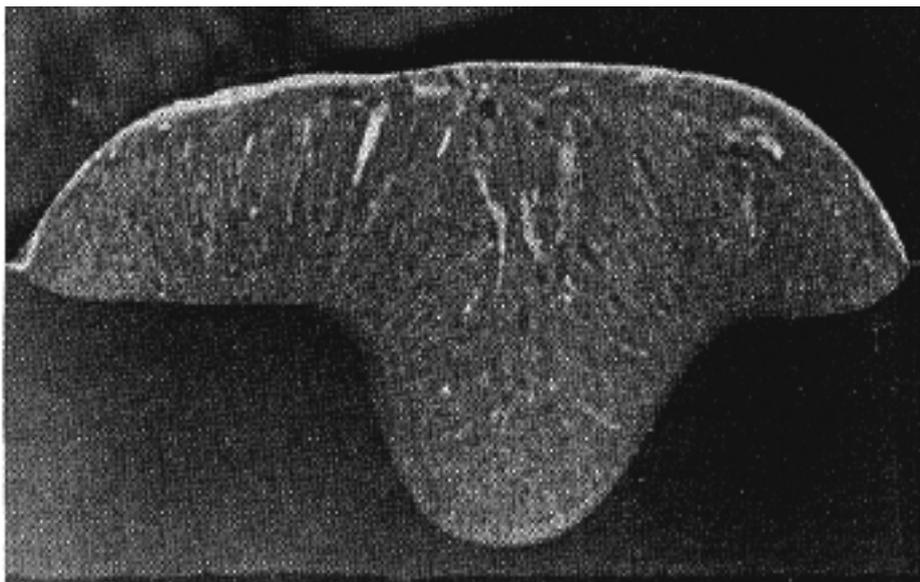


Fig. 3.12: Section transversale d'un cordon de soudage faite par soudage M.I.G. avec argon comme gaz protecteur. Pénétration en forme de doigt (centre très chaud) dû au jet de plasma.

Lors que l'arc avance, la pression de l'arc n'agit plus au centre du bain de fusion d'où un déplacement du bain de fusion vers l'arrière de l'arc (par rapport à la direction d'avancement). Si le bain de fusion est complètement écarté le métal qui vient d'être fondu au front est fait passer par le fond du bain de fusion, cf. Fig. 3.13. Ceci est surtout le cas pour des courants importants et en cas de tension de surface faible.

3.1.1.7 Nature et fonction du gaz protecteur

Le métal fondu dans le bain de fusion a en général une affinité avec les éléments qui sont dans l'atmosphère naturelle, notamment l'oxygène et l'azote. Puisque les réactions entre l'atmosphère et le métal peuvent donc changer la composition du bain de fusion voire nuire la performance de

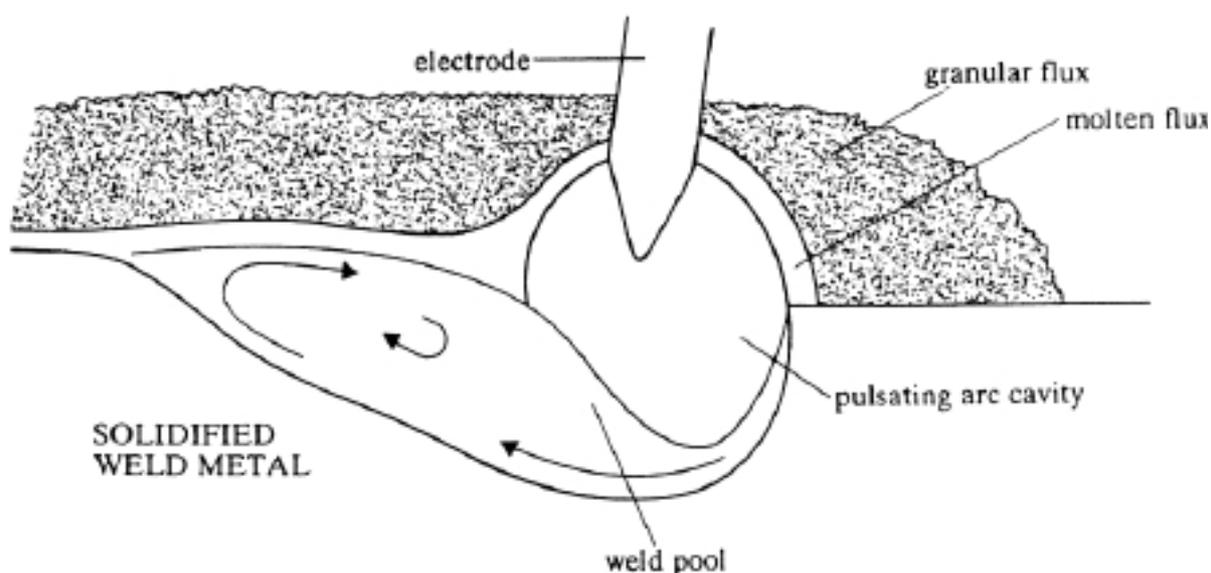


Fig. 3.13: Situation typique dans le soudage à l'arc submergé: La force de l'arc écarte le bain de fusion de en dessous de l'arc; la tension de surface est donc pas assez forte pour contrer la pression de l'arc.

la soudure, on a intérêt de limiter ou au moins de bien contrôler ces réactions. On utilise donc souvent de mélanges de gaz qui sont amenés autour de l'arc électrique pour protéger le bain de fusion d'où le nom gaz protecteur. L'utilité de ces gaz ne s'arrête pourtant pas là, et le choix de gaz protecteur a une influence sur un nombre d'autres paramètres dans le soudage. En ce qui suit les différentes propriétés du gaz et les paramètres qu'elles affectent sont présentées.

L'énergie de ionisation

Le gaz protecteur est le milieu dans lequel est établi l'arc électrique. Les atomes ou molécules du gaz protecteur sont donc ionisés. L'énergie qui est nécessaire de transformer un atome ou molécule dans un ion est appelée l'énergie de ionisation. Elle est à peu près constante pour tous les gaz protecteur sauf l'hélium qui a une valeur à peu près double de ceux des autres gaz. Plus l'énergie de ionisation est grande plus la tension de l'arc est grande d'où découle une plus grande puissance de l'arc (tout autres paramètres restant constant). Par contre, une énergie de ionisation élevée rend l'amorçage de l'arc plus difficile, ce qui est cause d'une stabilité diminué, notamment en courant alternatif.

La conductivité de chaleur

La conductivité de chaleur est déterminante pour la distribution de la chaleur radiale et en direction de l'arc et affecte donc la géométrie de la pénétration. Plus la chaleur est transportée aux bords plus la zone chaud est élargie et plus la pénétration se fait de manière homogène. L'argon qui a une conductivité de chaleur faible a donc tendance de produire des intrusions de forme d'un doigt (cf. Fig. 3.12) au centre parce que la chaleur est concentrée au centre. Par contre, les gaz plus légers, notamment l'hélium et l'hydrogène, ont une conductivité de chaleur élevée qui engendre des bains de fusions plus réguliers. Evidemment, une conductivité de chaleur élevée a aussi une influence sur la perte d'énergie vers l'extérieure, elle diminue donc également un peu le rendement du procédé.

La capacité de se dissocier et de recombinaer

Pour les gaz protecteurs qui sont composés de molécules, il existe encore une autre façon de transporter la chaleur. L'énergie qui est nécessaire pour se dissocier peut être récupéré lors de la recombinaison. Puisque ceci n'a pas lieu au même endroit, il en suit un transport de chaleur du point où la molécule s'est dissociée à l'endroit, où elle re-combine. La dissociation a lieu en général à température élevée tandis que la recombinaison se fait surtout à des endroits plus froids. Ceci permet au dioxyde de carbone et à l'hydrogène d'avoir une conductivité de chaleur apparente qui est comparable à celle de l'hélium.

La réactivité et le potentiel d'oxydation

Bien que les gaz protecteurs soient utilisés en premier lieu pour empêcher les réactions de l'atmosphère avec le bain de fusion, on utilise parfois des additions réactive comme l'oxygène et le dioxyde de carbone pour modifier la surface du bain de fusion (en formant une couche de laitier ou en diminuant la tension de surface, cf. 3.1.1.6). En même temps ces additions de gaz réactif changent sensiblement le mode de transfert du métal de l'électrode fusible au bain de fusion. En diminuant la tension de surface, le gaz réactif stabilise le transfert par pulvérisation, cf. 3.1.1.2.

Pour la même raison, la fluidité du métal liquide est augmentée d'où une diminution de problèmes liés aux irrégularités de la géométrie de la soudure. Par contre, la capacité de remplir les fentes entre deux plaques est en même temps diminuée.

Mélanges de gaz

Comme on a pu constater, les différents type de gaz ont des différentes capacités et défauts. Pour bien remplir toutes les exigences d'une application de soudage, il est souvent souhaitable de combiner les effets. Ceci est possible en grande mesure en utilisant des mélanges de différents gaz. Un mélange entre hélium et argon permet de prendre avantage de la bonne stabilité de l'arc et la facilité de l'amorçage associées à l'argon et en même temps augmenter la chaleur apportée aux pièces à souder. Puisque les deux composants sont inertes, ce mélange est surtout utilisé quand il est question de souder des pièces épaisses de cuivre ou d'aluminium, tandis que pour l'acier, on préfère souvent des mélanges contenant un composant réactif.

Il est hors de la portée de ce cours de présenter tous les mélanges utilisés dans la technique de soudage. Il est à ce moment suffisant de savoir que presque chaque application et chaque matériau a un mélange de gaz protecteur qui est spécialement adapté à l'exigence. Pour plus d'informations tenez vous à l'article en réf. [17], p. 64.

3.1.2 Procédés de soudage par arc électrique

En général on peut distinguer les procédés de soudage par arc électrique par (i) la fonction de l'électrode (si elle est fusible ou non) et (ii) par le genre de protection du bain de fusion qui est employée (protection gazeuse ou flux vitreux/laitier). Dans ce qui suit les différents procédés de soudage utilisant l'arc électrique sont présentés.

3.1.2.1 Soudage à la main avec électrodes enrobées

Le soudage à la main avec des électrodes enrobées est surtout utilisé pour toute sorte de petit soudage, des petites séries, des géométries non-standard etc.. La portabilité et le faible coût de l'équipement sont des avantages. Principalement, des aciers de construction non et faiblement alliés et, pour une moindre part, les aciers inoxydables sont soudés avec les électrodes enrobées. Le procédé est schématisé en figure 3.14.

L'électrode métallique est enrobée par un mélange de composants organiques (cellulose) et inorganiques (oxyde de titane, silicate de potassium, carbonate de chaux). La fonction de cet enrobage est polyvalente:

- Les silicates facilitent l'amorçage de l'arc par leur faible potentiel de ionisation. Ceci est nécessaire car les gaz de l'atmosphère (N_2 , O_2) sont difficiles à ioniser.
- L'enrobage peut fournir certains éléments d'alliage qui risquent d'être évaporés du bain de fusion à cause de leur pression de gaz élevée (p. ex. Cr, Mn, Zn) ou à cause de leur tendance d'être enrichi dans le laitier du à leur affinité à l'oxygène (p. ex. Si, Mn).
- Les constituants inorganiques forment un laitier qui flotte sur le bain de fusion et le protège contre l'oxydation et la nitruration. De plus, l'acier peut être désulfuré d'une manière efficace, ce qui diminue le risque de fissuration à chaud.
- En fonction de la composition de l'enrobage, le mode de transfert du métal de l'électrode s'effectue par pulvérisation ou par court-circuit.

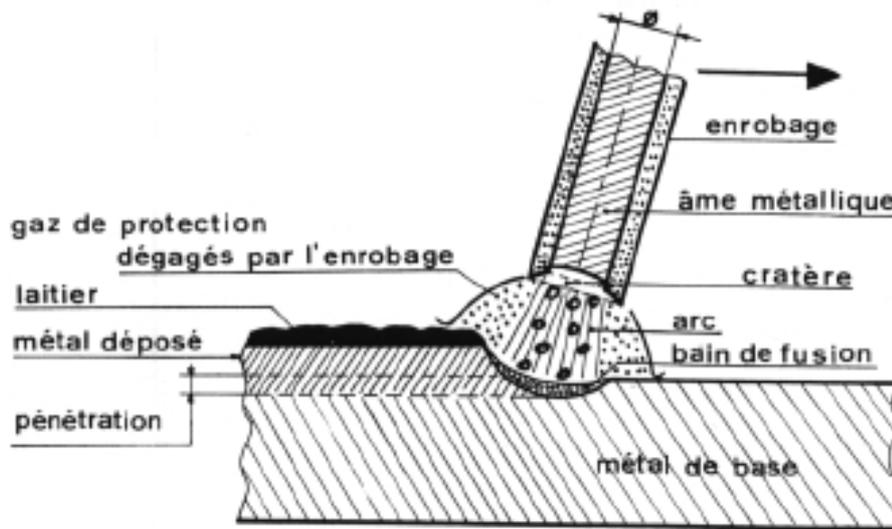


Fig. 3.14: Le procédé de soudage avec électrode enrobée. L'électrode est de longueur de quelques dizaines de centimètres. L'opérateur guide l'électrode de manière pour établir un cordon de soudage continu.

- Finalement, si la couche de laitier est assez épaisse, elle peut sensiblement retarder le refroidissement qui, autrement, pourrait engendrer un durcissement par trempe dans certains aciers faiblement alliés.

Les inconvénients du procédé sont la productivité limitée notamment à cause du changement fréquent de l'électrode. À part le fait que des électrodes plus longues sont peu pratiques pour le soudage à la main, la longueur est aussi limitée par le chauffage par l'effet Joule. Même si le rendement η est assez élevé (à 0.9-1 environ), la faible énergie de soudage (encore limitée par le chauffage de l'électrode par l'effet de Joule, d'où une limite de courant) nécessite pour certains aciers faiblement alliés un préchauffage et un post-chauffage afin d'éviter une ductilité réduite.

3.1.2.2 Soudage automatique sous flux solide (arc submergé)

Le soudage sous flux solide est un procédé automatisé voisin du soudage par électrode enrobée. Un fil-électrode est amené automatiquement lorsque l'arc jaillit. Le flux en forme de poudre est ajouté en grande quantité par un tuyau ce qui fait que l'électrode entre dans le flux et l'arc est submergé. Ceci fait que le rendement η de ce procédé est très haut (env. 1) car les pertes par convection, par rayonnement et dans l'électrode qui entre le bain de fusion sont minimisées. Un schéma est donné dans figure 3.15. Le fil-électrode est lié à la borne positive, il sert donc comme anode. Le fil-électrode est contacté avec l'anode du générateur à proximité immédiate du bain de fusion afin d'éviter un sur-chauffage du fil par effet Joule. La température étant plus élevée à l'anode, le fil fond plus rapidement et l'apport de métal est plus important. Parfois même plusieurs fil-électrodes sont amenés en même temps pour augmenter le taux de déposition de métal.

Pour des hautes intensités de courant (en dessus de 1000 A) le courant alternatif est préféré car il offre plus de stabilité dans l'arc. Le flux qui fond sous la chaleur de l'arc permet de continuellement rallumer l'arc en libérant du gaz qui facilite l'amorçage. N'étant pas limité au courant continu, ce procédé peut atteindre des valeurs d'énergie de soudage très élevées, ce qui permet une pénétration importante et un apport de métal élevé. La zone de soudage est couverte

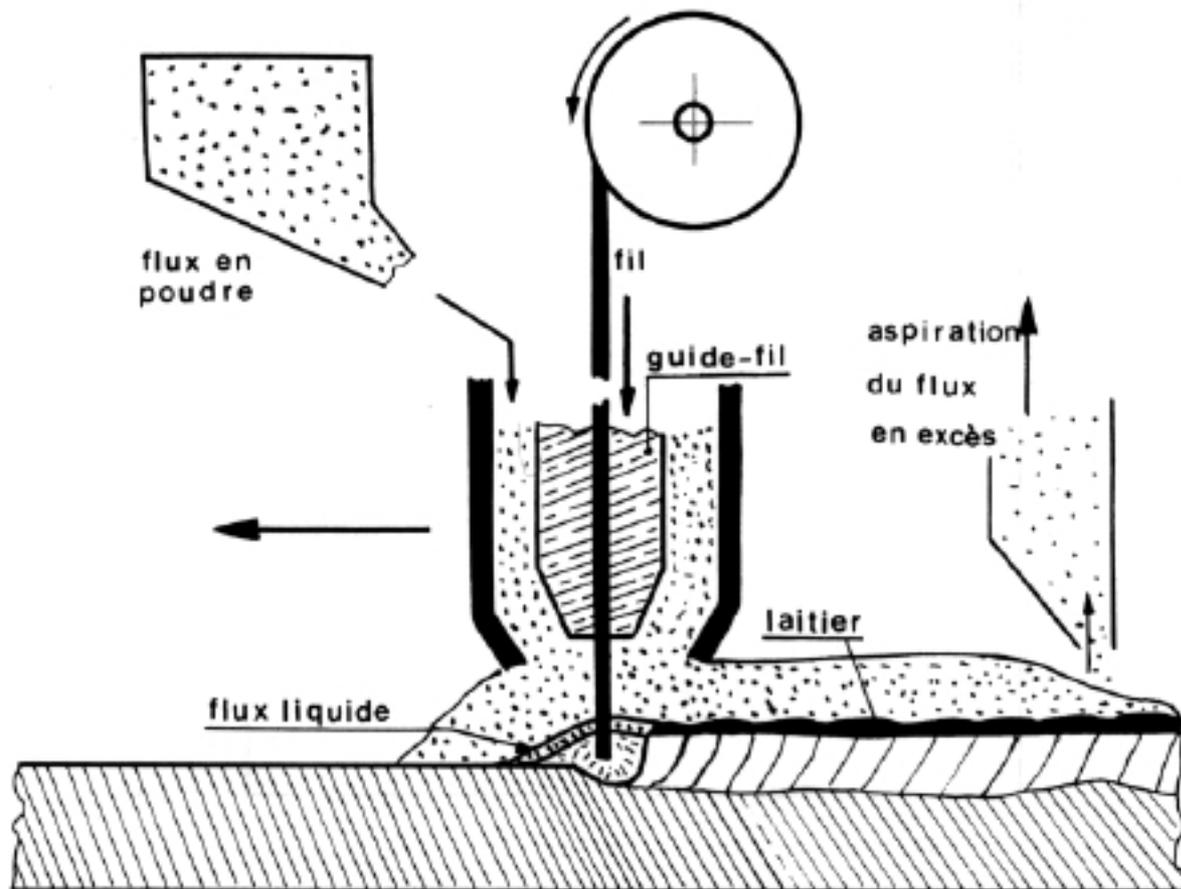


Fig. 3.15: Schéma du soudage à l'arc submergé. Le flux solide est déposé par un tuyau autour l'électrode et est aspiré après la solidification du cordon derrière l'arc. Il y a néanmoins la partie fondue du flux à enlever après le soudage.

par le flux, ce qui ralentit le refroidissement et permet une haute vitesse de soudage (quelques mètres par min).

Les limitations du procédé sont surtout qu'il s'applique seulement à des géométries simples et notamment des soudures horizontales. Il est exclusivement utilisé pour les aciers. Le coût de l'équipement est assez élevé et s'impose donc seulement dans les cas où il est question de fabrication en série de soudures exigeant de grand quantité de métal d'apport.

3.1.2.3 Soudage sous protection gazeuse (M.I.G. ou M.A.G)

La figure 3.16 schématise le principe de soudage semi-automatique sous protection gazeuse. La chaleur nécessaire à la fusion des pièces à souder est fournie par un arc électrique établi entre le fil-électrode et les pièces. La protection de l'arc et du bain est assurée par un gaz inerte (argon, hélium) ou par un gaz actif (CO_2 +autre) qui donnent leur nom au procédé: M.I.G. (metal inert gas) et M.A.G. (metal active gas). Ce gaz est continuellement amené autour du fil-électrode.

Pour les mêmes raisons que dans l'arc submergé, le fil-électrode est contacté avec l'anode du générateur qui est constitué d'un tube de contact juste avant le bain de fusion. La caractéristique plate du générateur permet au procédé de régler le fil à une longueur constante: si le fil fond trop rapidement (par rapport à la vitesse d'alimentation) l'arc s'allonge d'où une augmentation de

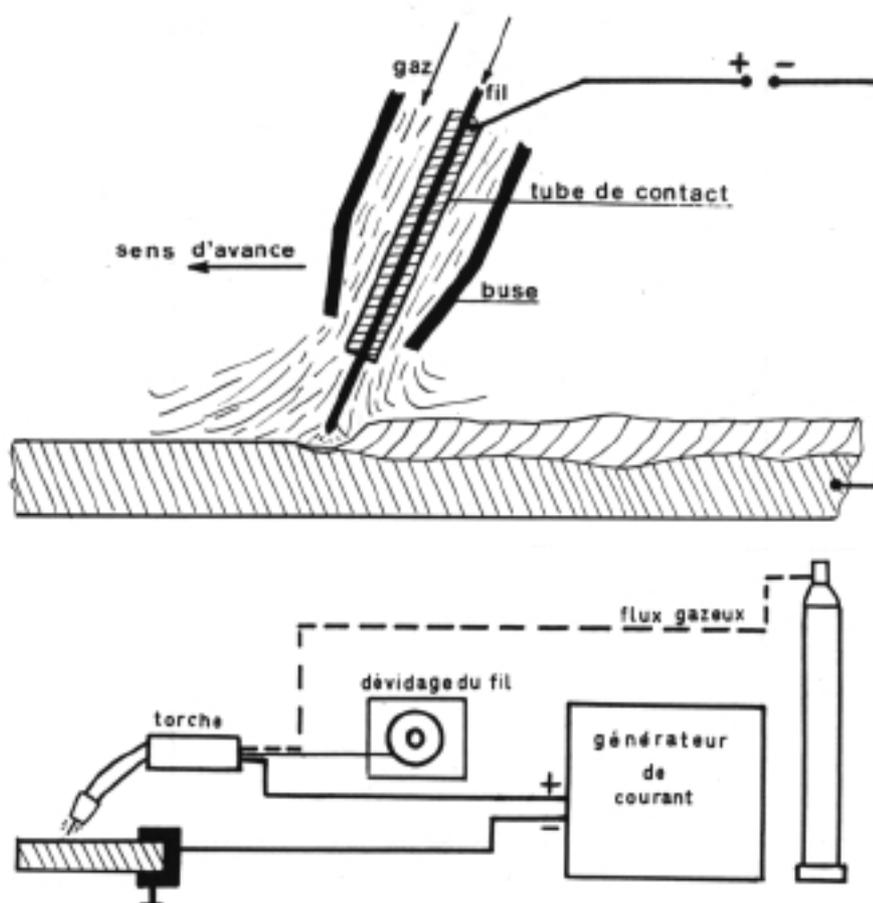


Fig. 3.16: Le soudage M.I.G. ou M.A.G.: Le fil électrode est continuellement apporté à partir d'une bobine. Le gaz coule autour du fil apporté par une buse.

tension entre les électrodes et l'intensité décroît. Par contre, si le fil fond trop lentement l'arc est raccourci et le courant est augmenté, faisant fondre le fil plus rapidement.

Le transfert du métal dans l'arc se fait par pulvérisation (courant au-dessus de 200 A) ou par gravitation (court circuits répétitifs) (courants entre 30 et 200 A). Le premier est utilisé pour des dépôts de métal importants alors que le dernier a ses applications dans le soudage de tôles de faible épaisseur.

Le métal d'apport se trouve soit sous forme de fil nu, soit de fil fourré avec du flux en poudre. Le fil-électrode a normalement une composition voisine de celle du matériau à souder. Les diamètres sont typiquement de 1 à 3 mm. Le fil fourré permet de combiner les effets bienfaisants de la protection gazeuse avec ceux du flux solide ou liquide, notamment l'ajustage de la composition du bain de fusion et la solidification ralentie. La production du fil fourré est schématisée en figure 3.17.

Le rendement η des procédés M.I.G et M.A.G. est un peu plus bas que celle des méthodes décrites précédemment (0.7 à 0.8) à cause des pertes par rayonnement et par convection forcée. Le gaz protecteur est typiquement l'argon pur avec des additions de CO_2 et/ou d'oxygène parfois combiné avec He. Le gaz carbonique pur est utilisé seulement en mode court-circuit, car il diminue la tension de surface et facilite ainsi le transfert. Sa capacité de dissocier et recombinaison engendre un transfert de chaleur plus fort dans le bain de fusion. En revanche, la fluidité du bain

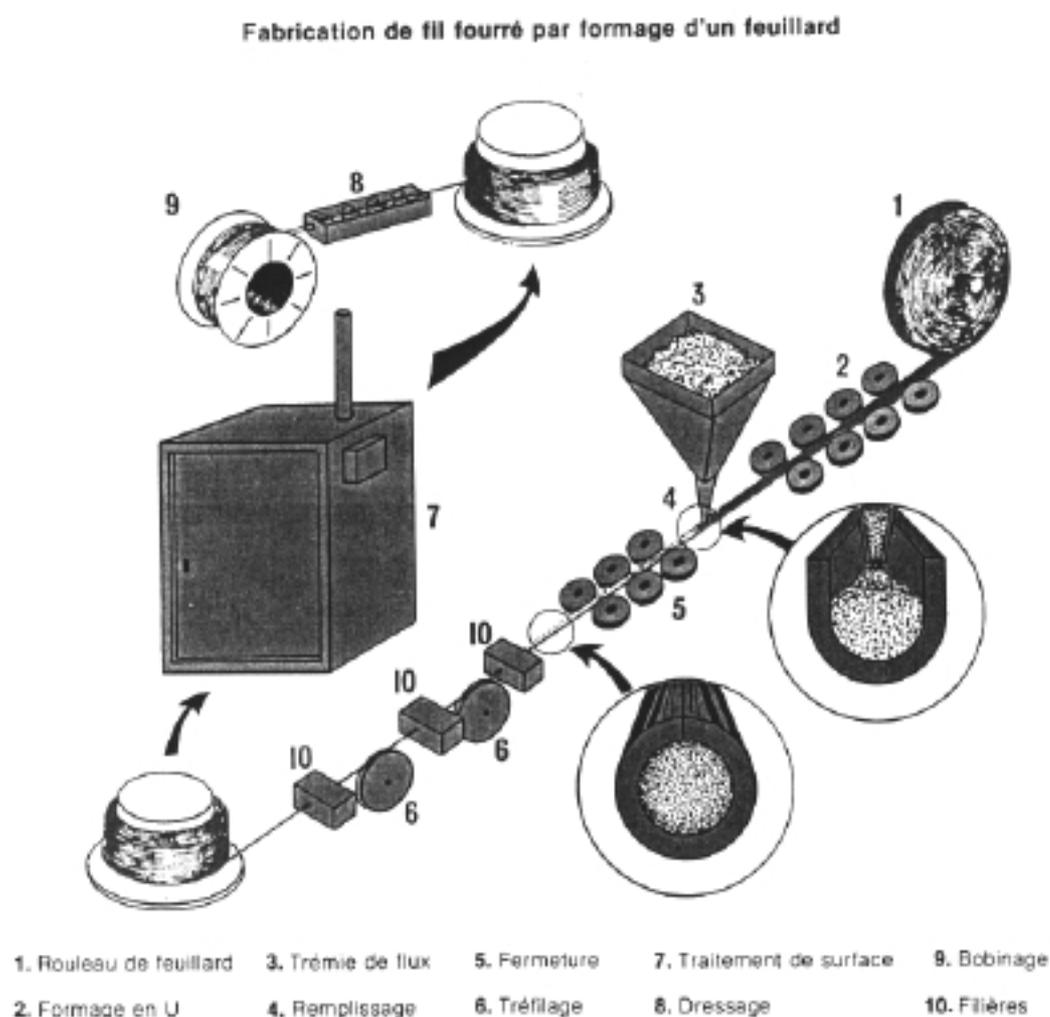


Fig. 3.17: Production d'un fil fourré utilisé en procédé M.I.G. ou M.A.G.. Le fourrage peut contenir des éléments d'alliage pour aussi bien que du flux pour action protectrice ou désoxydante/désulfurante.

de fusion est également augmentée ce qui diminue la capacité de remplir une fente large. De plus, l'addition de CO_2 et d'oxygène permet de stabiliser la position de l'arc.

Un avantage de ce procédé est la productivité élevée comparée au soudage avec électrode enrobée. Il est applicable à pratiquement tous les métaux, dans toutes les positions, ce qui reflète un avantage par rapport à l'arc submergé. À cause de la protection gazeuse, la soudure doit être effectuée dans une atmosphère calme, à l'abri du vent ce qui pose des problèmes sur les chantiers. Puisque la bobine de fil est une installation que l'on ne change pas trop souvent, le procédé est surtout bien approprié pour des séries de taille moyenne, tandis que pour plus de flexibilité au niveau changement de métal on préfère le soudage T.I.G. ou par plasma.

3.1.2.4 Soudage sous gaz inerte avec électrode en tungstène (T.I.G.)

Le procédé T.I.G. (tungsten inert gas) est très proche du procédé M.I.G. décrit dans la section précédente. La différence est que l'électrode n'est pas censée fondre, ce qui exige qu'elle soit refroidie et faite d'un métal de point de fusion très élevée, souvent le tungstène, d'où le nom. Le métal d'apport est fourni par une source externe et le gaz protecteur est toujours l'argon, parfois

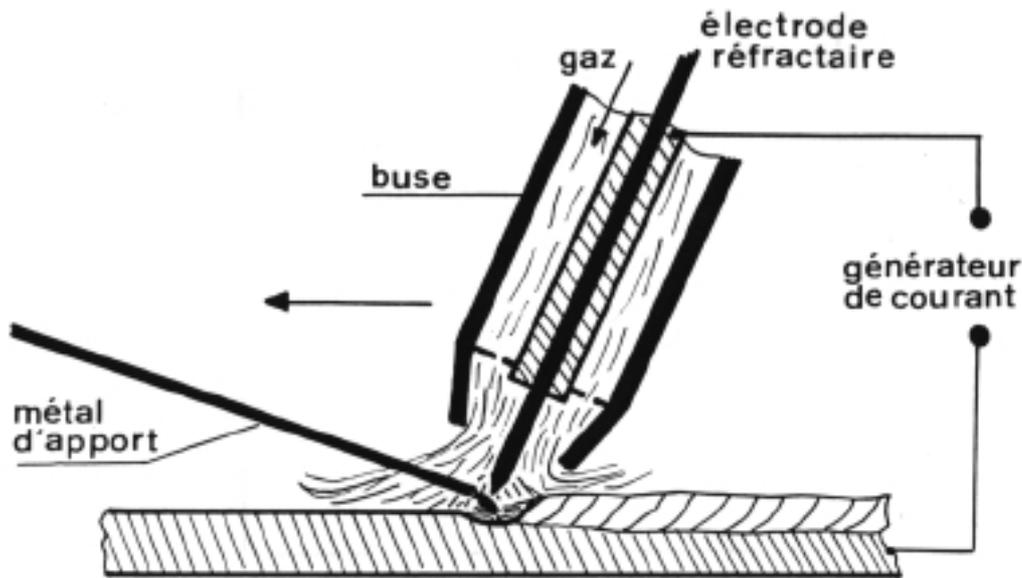


Fig. 3.18: Schéma du procédé T.I.G.: L'électrode réfractaire remplace le fil électrode du procédé M.I.G. L'électrode est refroidie par un circuit d'eau ou par le gaz. Puisque l'opérateur doit tenir à la limite le fil de métal d'apport et la buse pour guider le cordon, des contrôles par pieds s'imposent.

avec des additions de He et/ou de H_2 qui augmentent la puissance de l'arc. Le procédé est schématisé en figure 3.18. L'électrode en tungstène est améliorée avec quelques additions, notamment 1 à 2% de thorium (contre l'usure, pour faciliter l'amorçage et augmenter l'intensité) et 0.3 à 0.5% zirconium (pour des électrodes on courant alternatif, surtout).

En général, l'électrode en tungstène est liée à la borne négative d'un générateur de caractéristique plongeante afin d'éviter sa désagrégation. Le T.I.G. permet d'utiliser du courant alternatif, ce qui est important pour le soudage de l'aluminium et ses alliages, voir aussi section 3.1.1.3.

Le métal d'apport pour le procédé T.I.G. doit être d'une pureté élevée et les pièces à souder doivent être nettoyées de toute contamination. Le fait que l'électrode n'entre pas dans le bain de fusion (au-delà des pertes par rayonnement et convection) est responsable du faible rendement du procédé (0.25 à 0.5). Pour cette raison, le procédé T.I.G. est surtout appliqué pour souder des tôles de faible épaisseur (5 mm). Il permet de grandes vitesses de soudage et produit des soudures de très bel aspect et bonne qualité. Le désavantage est la préparation assez sophistiquée et le relativement faible apport ce qui le rend peu économique pour des épaisseurs importantes. Le développement du soudage par plasma—traité dans la section suivante—a encore plus limité la gamme d'application pour le soudage par T.I.G..

3.1.2.5 Soudage par plasma

Le soudage au plasma s'apparente au procédé T.I.G. mais utilise un arc électrique mécaniquement étranglé. Cet étranglement fait que l'arc est confiné à une section réduite augmentant son intensité, voire la température et donc la concentration d'énergie. La rigidité de l'arc, c'est-à-dire: sa pression, est très élevée permettant même de percer un trou à travers des pièces à souder, pourvu que l'épaisseur soit assez faible (7 mm). Un schéma du procédé plasma est donné dans figure 3.19.

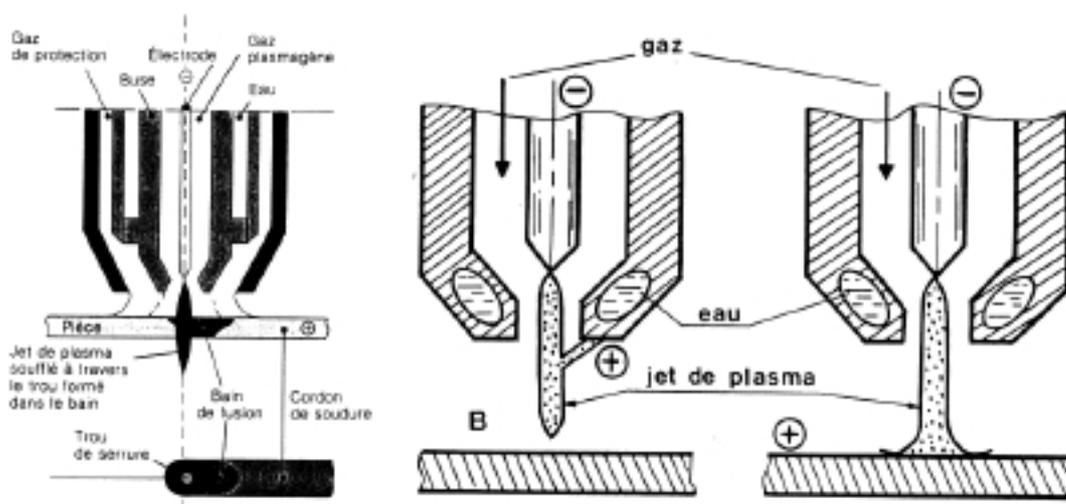


Fig. 3.19: La situation autour de l'arc dans le soudage par plasma (à gauche); l'équipement est comparable au soudage T.I.G.. L'arc existe sous forme soufflé (milieu) ou transféré (à droit). L'avantage de ce dernier est que l'énergie transmise au pièce peut sensiblement être contrôlé par la vitesse du gaz et

Le gaz protecteur est l'argon ou argon avec quelques pour-cent d'hydrogène. Pour des courants importants (entre 40 et 400 A) on utilise l'arc transféré, ce qui veut dire que l'arc est établi entre la pièce à souder et l'électrode en tungstène. Pour le soudage par microplasma, utilisé pour des épaisseurs très faibles, on emploie normalement l'arc non-transféré ou soufflé dont le principe est aussi montré en figure 3.19, à droite. La différence par rapport à l'arc transféré est que la buse forme l'anode. Ce genre d'arc se prête aussi pour le soudage des pièces non-conductrices. Etant donné qu'en mode d'arc soufflé, les deux électrodes sont refroidies, le rendement est très faible.

L'avantage de ce procédé par rapport au procédé T.I.G. est que la pénétration est beaucoup plus importante, ce qui permet de souder des pièces en moins de passes rendant ainsi le procédé plus économique, cf. figure 3.20.

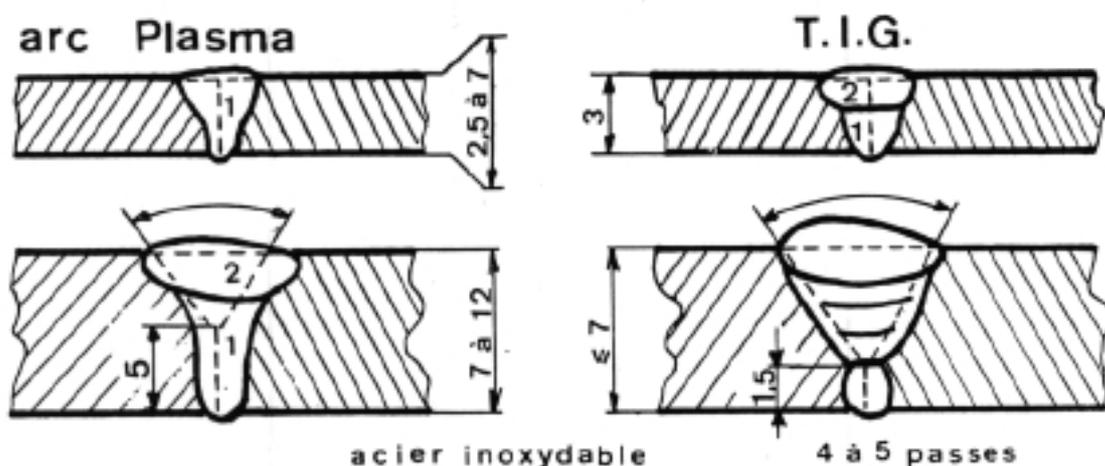


Fig. 3.20: Comparaison de nombre de passe nécessaire pour accomplir un soudage bout à bout de deux tôles pour le soudage par plasma (à gauche) et le soudage T.I.G. (à droite).

3.2 Soudage par résistance électrique

3.2.1 Généralités

Le soudage par résistance électrique a été employé dans l'industrie avant les procédés à l'arc électrique à cause des difficultés métallurgiques moins flagrantes. La protection du bain de fusion étant fournie par la géométrie de l'assemblage, peu de contaminations diminuent la qualité du joint.

Principe de fonctionnement

Le soudage par résistance électrique se base sur l'effet de Joule. Un métal est chauffé par un courant qui passe, en fonction de l'intensité du courant I , la résistance R du métal et le temps t_c pendant lequel le courant passe. Rappelons que l'énergie dans l'effet Joule E_j est liée à ces trois paramètres par:

$$E_j = I^2 R t_c \quad \text{ou} \quad E_j = \frac{U^2}{R} t_c$$

si c'est la tension qui est connue. La résistance dépend du matériau et de la géométrie du conducteur. Vu que le courant passe aussi à travers les électrodes, il est important de produire la plus grande résistance à l'endroit que l'on veut souder. Sinon, les électrodes vont être soudées aux pièces ou même chauffées plus fortement que les pièces à souder et elles vont fondre elles-mêmes. Pour assurer ceci, on réduit également la section à l'endroit à souder pour y augmenter la densité de courant. Les électrodes sont souvent en alliage de Cuivre (-Zr, -Cr, ou -Zr-Cr) qui a une résistance basse et se refroidit facilement. Le schéma du principe est donné en figure 3.21. Pour assurer la jonction, une pression est appliquée par les deux électrodes, ce qui limite aussi la section de contact dans les pièces à souder. Les générateurs de courant sont généralement de type transformateur fournissant un courant alternatif.

Dans ce qui suit, les procédés principaux dans lesquels la soudure est faite par résistance électrique sont présentés.

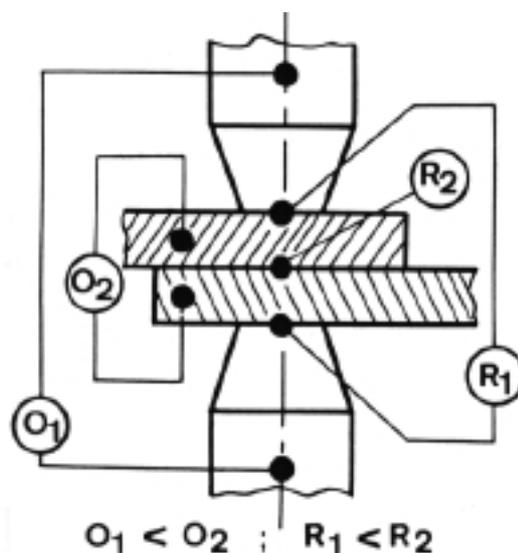


Fig. 3.21: Schéma du procédé de soudage par résistance électrique. La plus grande résistance doit être à l'endroit où la soudure est prévue.

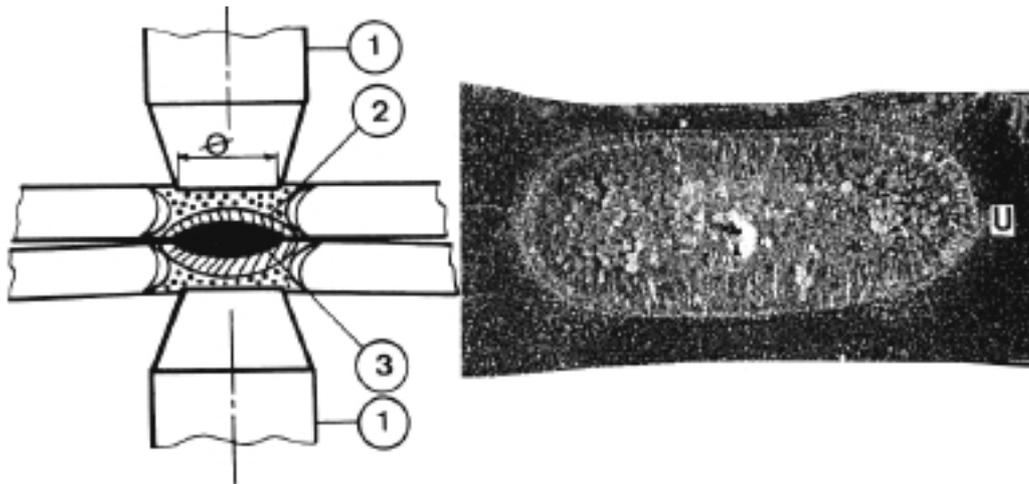


Fig. 3.22: Le soudage par résistance par point: La région autour du point de contact entre les deux tôles à souder est fondue par la chaleur dégagée par le courant qui passe. Le joint, de forme d'une lentille, a une structure de solidification caractéristique.

3.2.2 Procédé de soudage par résistance électrique

3.2.2.1 Soudage par point

Ce procédé s'applique surtout pour le soudage des tôles dans tous les matériaux de construction, sauf ceux qui ont une résistivité électrique faible notamment l'aluminium, où les paramètres du procédé doivent être contrôlés dans des limites assez étroites. Les électrodes sont deux pièces plus ou moins pointues en cuivre. Les pièces à souder sont mises sous pression et le courant passe pendant une courte durée, fondant ainsi les points de contact, cf. le schéma en figure 3.22. Les épaisseurs soudables dépendent du matériau, mais peuvent atteindre 20 mm.

3.2.2.2 Soudage par bossage

Il s'agit d'un procédé voisin du soudage par point, la seule différence étant que le point de contact est limité par la géométrie des pièces à souder, p. ex. deux tubes croisés, des tôles

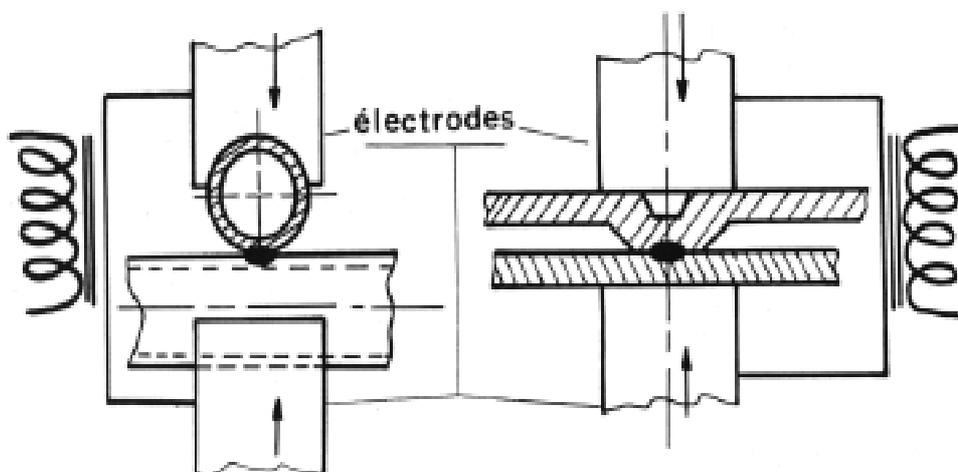


Fig. 3.23: Schéma du procédé de soudage par bossage: Les pièces ont une topographie qui engendre un point de contact très limité ce qui produit une densité de courant élevée. A gauche: Jonction entre deux tubes croisés; à droite bossage obtenu par matriçage.

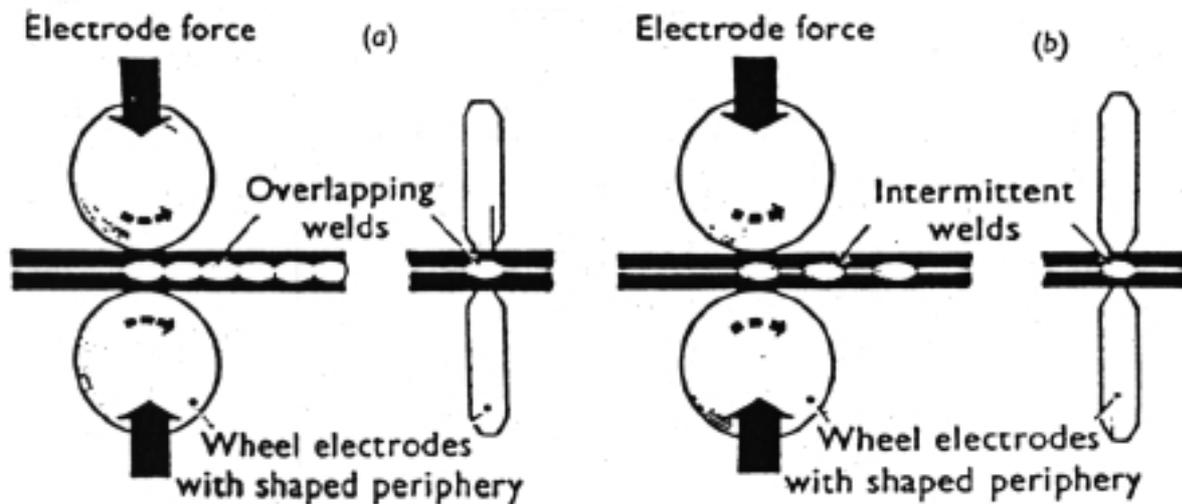


Fig. 3.24: Schéma du soudage à la molette. Les électrodes sont sous forme de roue permettant un avancement des pièces à souder tout en gardant le contact électrique. L'intervalle entre deux points soudés contrôle si la soudure est continue (a) ou pas (b).

embouties etc.. Les électrodes sont adaptées aux pièces pour limiter la résistance électrique du contact électrode/pièce. La qualité de la soudure peut être augmentée si le point de contact est sous pression, ce qui produit un joint plus grand. Deux différentes dispositions pour ce procédé sont donné dans fig. 3.23.

3.2.2.3 Soudage à la molette

Le soudage à la molette est une version continue du soudage par point. Les électrodes sont deux roues qui tournent en sens opposé ; ainsi, une pression appliquée permet le transport des pièces à souder (souvent des tôles). Ceci est très voisin au soudage par ultrason en ligne, cf. fig. 2.7. Le soudage peut être effectué en mode continu (le courant passe à très courts intervalles, donc il y a une soudure continue, voir fig. 3.24 à gauche) ou en mode interrompu où le courant passe seulement à un certain intervalle, cf. fig. 3.24 à droite. Les applications sont l'assemblage de tôles par recouvrement pour des faibles épaisseurs et la fabrication des tubes à partir d'une feuille métallique (p. ex. protection électromagnétique d'un conducteur de signal faible). Ce procédé offre des vitesses élevées ce qui le rend intéressant pour l'assemblage de tôles profilées. Deux applications possibles sont données en figure 3.25.

3.2.2.4 Soudage bout à bout

Dans le soudage bout à bout deux pièces cylindriques sont mises en contact et sous faible pression axial pendant que le courant passe. Ceci sert à préchauffer les pièces. Ensuite la force et le courant sont augmentés. Les parties en contact sont extrudées et avec elles toute contamination, ce qui permet un contact purement métallique entre les deux pièces. Ainsi se fait le joint. On fait la distinction entre le procédé où la pression est appliquée en même temps que le courant (soudage par résistance pure) et celui où la pression est appliquée après avoir chauffé les pièces (soudage par étincelage). Ce dernier représente la transition vers les procédés de soudage par pression à chaud. Les deux procédés sont schématisés en figure 3.26.

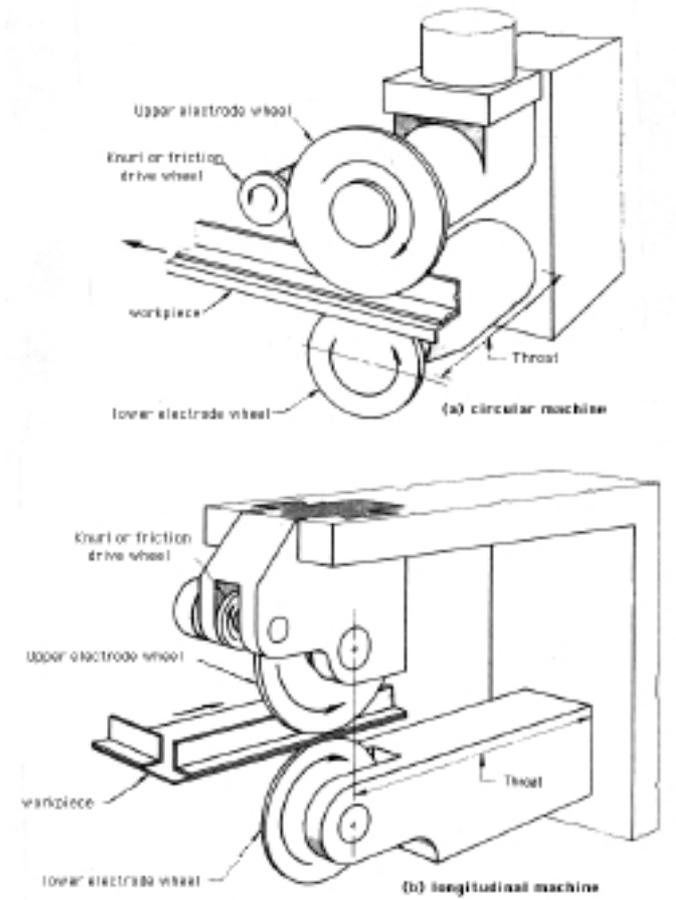


Fig. 3.25: Différentes applications du soudage à la molette dans l'assemblage de tôles minces.

3.2.2.5 Soudage vertical sous laitier

Dans le soudage vertical sous laitier, un arc électrique fournit la chaleur initiale pour amener le laitier et l'électrode à la température de travail. Il ne fait donc pas partie des procédés par résistance électrique dans le sens propre. Néanmoins, une fois le laitier (un sel inorganique) est

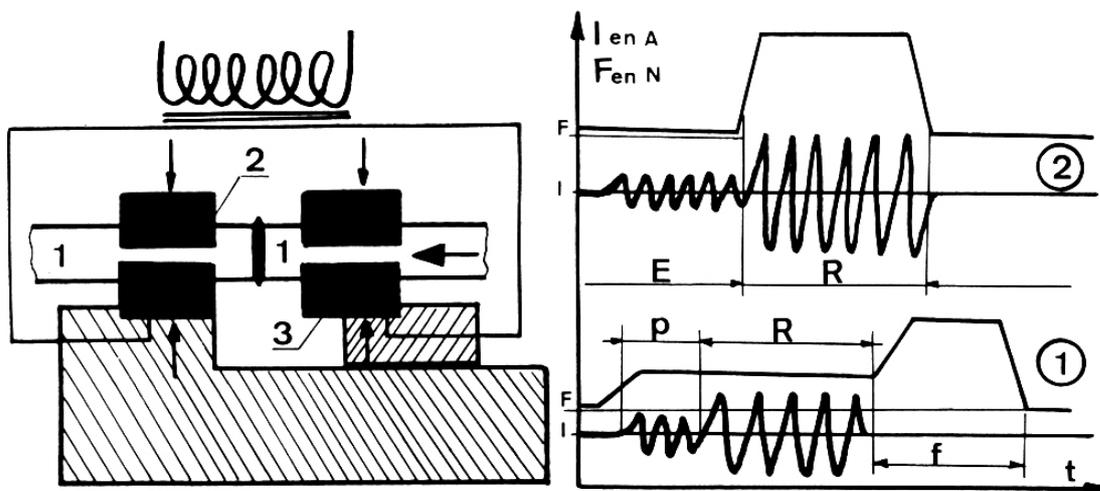


Fig. 3.26: Soudage bout à bout; (à gauche) schéma de principe (1. pièces à souder, 2. mâchoires fixes, 3. mâchoires mobiles); (à droite) intensité du courant et force de pression dans le procédé par résistance pure (1) et par étincelage (2) (E: étincelage, R: résistance pure, p: préchauffage, f: forgeage)

3.3 Soudage par faisceau

3.3.1 Généralités

Principe de fonctionnement

Un faisceau de particules chargées ou d'ondes électromagnétiques est focalisé vers et ensuite absorbé ou réfléchi par les pièces à souder. L'énergie cinétique des particules chargées et, respectivement, l'énergie des photons est transmise aux pièces et transformée en chaleur. L'énergie en jeu dans des procédés de soudage par faisceaux est généralement plus basse que celle dans des procédés par arc électrique par exemple, mais à cause de la focalisation la densité d'énergie peut surpasser celle desdits procédés, cf. figure 3.7. À nos jours il existe deux genres de faisceau qui sont utilisés pour le soudage: le laser et le faisceau d'électrons.

Les méthodes de soudage par faisceau sont en général du type autogène, ce qui signifie, qu'il n'y a pas de métal d'apport. Elles nécessitent des grands investissements qui ne sont justifiés que par leurs qualités exceptionnelles.

3.3.2 Procédés de soudage par faisceau

3.3.2.1 Soudage par laser

Le soudage par laser utilise un rayonnement lumineux intense et cohérent qui est focalisé sur la pièce à souder. Le rayonnement interfère avec les électrons dans le matériau à souder qui sont accélérés par le champ électrique changeant et ainsi absorbent son énergie. Le taux d'absorption A dépend de la résistance électrique ρ_e du métal à souder selon

$$A = 112.1 \sqrt{\rho_e}$$

pourvue que la surface soit polie. En outre, l'absorption est aussi fonction de la longueur d'onde du rayonnement. Dans la gamme de longueur d'onde des lasers industriels (0.4....10 μm) plus la longueur d'onde est grande moins il y a absorption des photons.

Pour le soudage, deux types de laser sont employés: le laser à base de CO_2 et le laser à base de

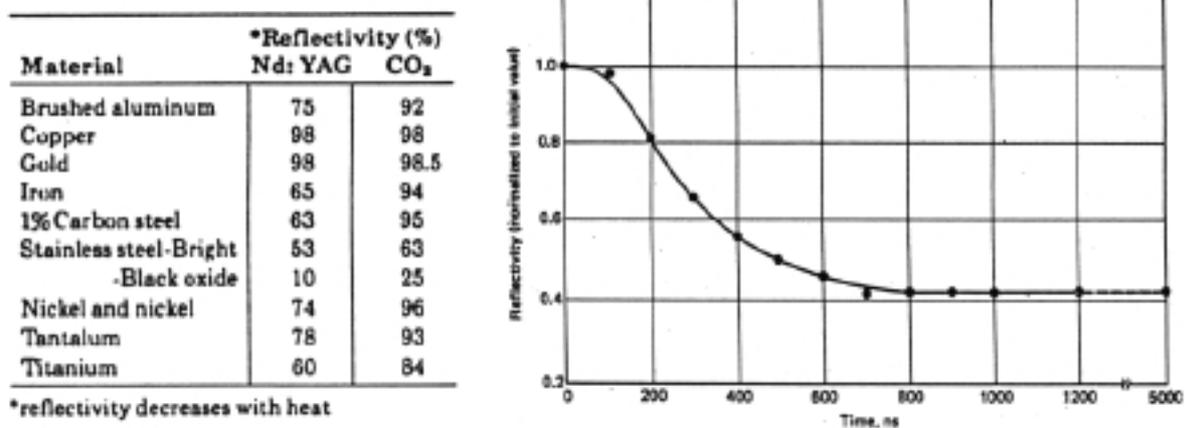


Fig. 3.28: (à gauche) Taux de réflexion en pour-cent de différentes surfaces pour le laser CO_2 et Nd:YAG. Le laser avec la longueur d'onde la plus courte (Nd:YAG) a une absorption plus haute. (à droite): l'absorption augmente en fonction de temps puisque le chauffage par laser augmente la résistivité du métal.

neodym-yttrium-aluminium-grenat avec le raccourci Nd:YAG. La différence entre les deux est la longueur d'onde ($1.06 \mu\text{m}$ pour le Nd:YAG, $10.6 \mu\text{m}$ pour le CO_2) et le rendement (0.04 pour le Nd:YAG et 0.2 pour le CO_2). La différence en absorption entre le laser CO_2 et le laser Nd:YAG pour quelques métaux est donnée en figure 3.28.

Le soudage par laser se fait en fonction de la densité d'énergie: pour des densités d'énergie plus basses que 10^6 à 10^7 W/cm^2 , le métal est fondu et la pénétration est de quelques millimètres au maximum: elle est contrôlée par convection/conduction. Pour des densités d'énergie entre 10^7 et 10^{10} W/cm^2 , le métal est vaporisé dans un cylindre de faible diamètre est la pression de cette vapeur stabilise la surface fondue autour de ce capillaire, cf. figure 3.29. Ainsi, on atteint une forte pénétration de soudage avec le laser.

Bien que les coûts d'un système laser soient plus élevés que pour d'autres procédés à base d'arc électrique, le laser surtout dans le mode de pénétration forte offre certains avantages notamment une vitesse de soudage élevée, peu d'influence dans les zones voisines de la bande soudée, une grande gamme de dimensions soudables et le soudage à des endroits difficiles à atteindre. De plus, des combinaisons de différents métaux inexploitable par des procédés conventionnels sont possibles avec le soudage par laser.

Le bain de fusion dans le soudage par laser ne doit pas forcément être protégé par flux liquide ou gazeux. Souvent, on ajoute quand même un gaz protecteur surtout avec l'aluminium et le titane.

3.3.2.2 Soudage par bombardement électronique

Le principe du soudage par bombardement électronique est tout près de celui d'un MEB sauf qu'en cas de soudage les courants sont beaucoup plus élevés, cf. la figure 3.30. Le rendement de ce procédé est près de 1. Comme pour le soudage par laser, la pénétration s est en principe assez faible sauf pour le cas où le métal est vaporisé. La pénétration est fonction de la tension d'accélération dans la colonne U et de la densité ρ du matériau bombardé selon

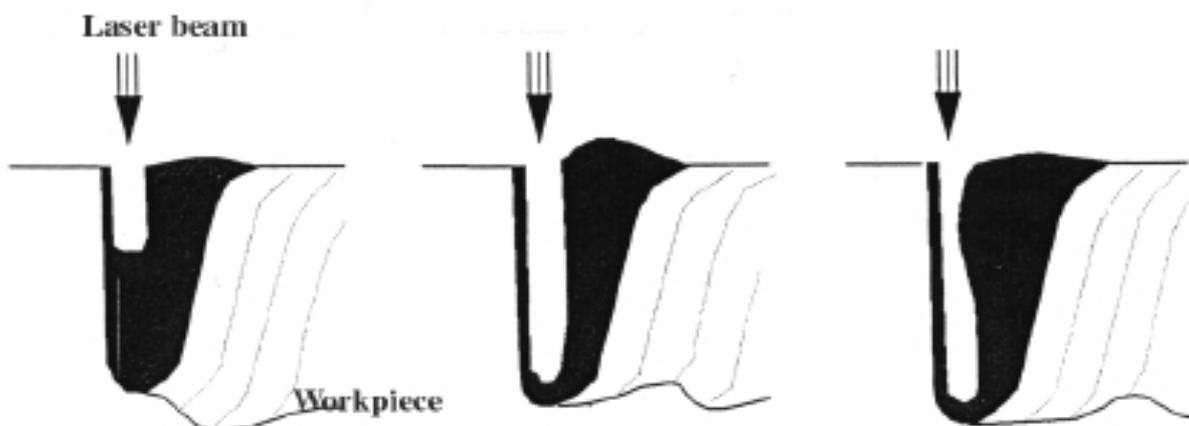


Fig. 3.29: Fonctionnement haute pénétration pour le soudage par laser. Le métal est évaporé et la pression de gaz stabilise le capillaire. Si le capillaire est trop profond et le métal fondu refroidi trop rapidement le capillaire est fermé par l'écoulement de la partie liquide tout en haut du capillaire. Ainsi des inclusions de gaz ou des pores sont formés dans les procédés à faisceau de laser ou d'électrons.

$$s \propto \frac{U^2}{\rho}$$

On voit donc bien d'où vient la capacité de pénétration forte: Si le métal est vaporisé, la densité du milieu à traverser décroît, moins d'énergie est absorbée, donc le faisceau pénètre encore plus, ce qui forme le même genre de capillaire que dans le soudage par laser permettant que la pénétration atteigne plusieurs dizaines de millimètres. Dans ce cas, la pénétration est limitée par l'angle de focalisation qui nécessite qu'un cylindre de plus grand diamètre soit vaporisé.

Une spécialité du soudage par faisceau est l'aptitude à souder à plusieurs niveaux en même temps par la technique « key-hole » (trou de serrure). Le faisceau perce un trou au travers du joint et peut agir avec l'intensité qui passe par ce trou sur un joint plus bas, cf. figure 3.30, à droite.

Ce qui nuit au succès de ce procédé est le fait que le faisceau électronique soit affaibli en passant au travers d'un milieu. Le procédé doit donc être employé à pression ambiante diminuée voire le vide. Cela limite les dimensions des pièces à souder même si des méthodes de vide graduel

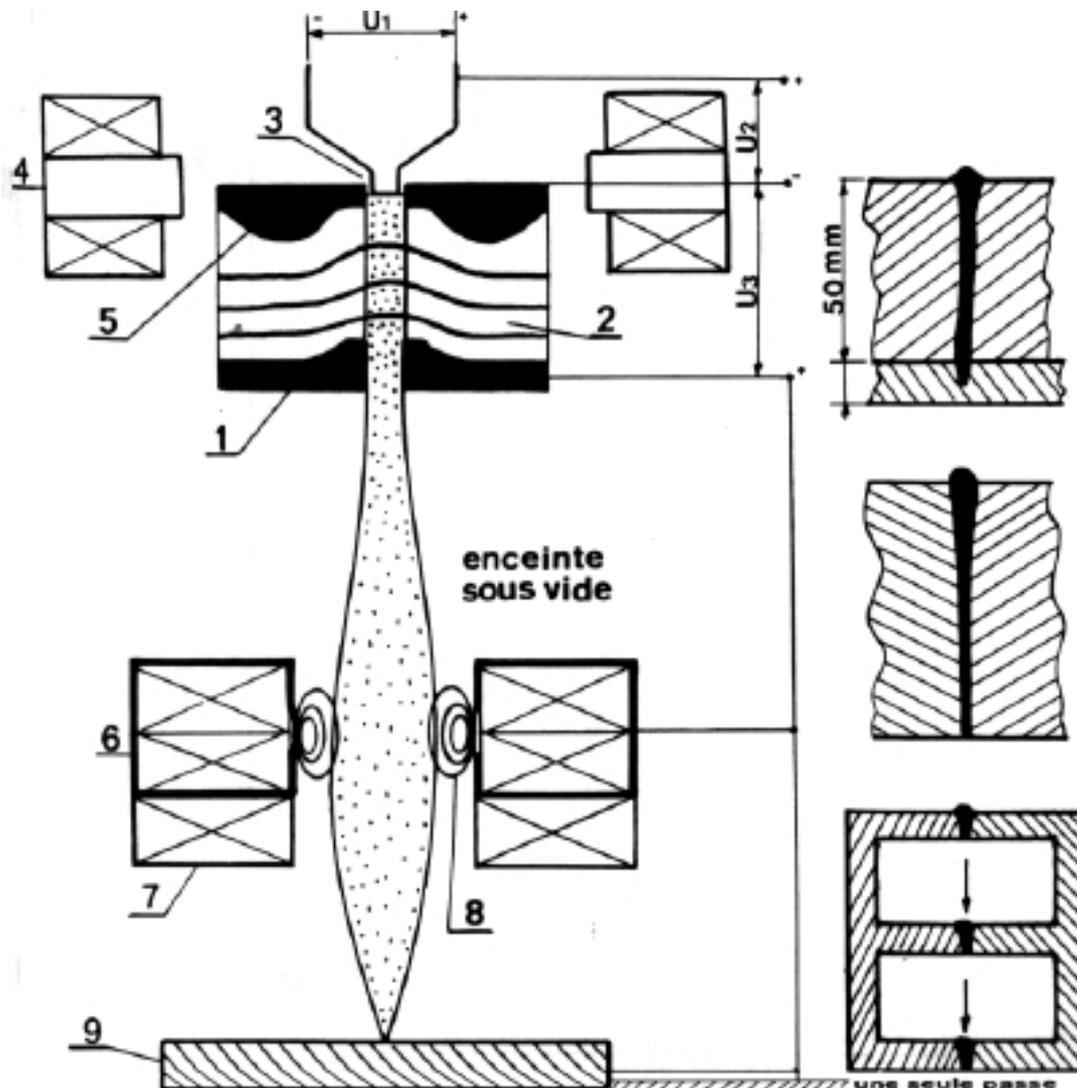


Fig. 3.30: Schéma de principe du soudage par bombardement avec électrons: Les électrons sont émis d'une cathode (3) et accélérés par le cylindre de Wehnelt (2). Ensuite, quelques lentilles électromagnétiques (7,8) permettent de focaliser et guider le faisceau sur les pièces à souder (9).

(chambre «à vide» avec plusieurs écluses demi ouvertes) ont été développées qui permettent un apport continu des pièces à braser.

De manière similaire au soudage par laser, les effets thermiques dans les zones voisines à la bande soudée sont très faibles, ce qui permet de souder même des pièces traitées thermiquement d'épaisseur importante sans nuire à leur performance mécanique.

Les coûts d'investissement sont très élevés pour un système de soudage par bombardement par électrons. La qualité, la pénétration très forte, et peu de problèmes avec des déformations thermiques et le haut rendement mécanique des joints soudés par faisceau justifient son utilisation pour certaines applications dans la technique de précision ou dans la microtechnique aussi bien que dans la construction, notamment dans les avions.

3.4 Soudage thermochimique

3.4.1 Généralités

Principe de fonctionnement

Dans le soudage thermochimique l'énergie est fournie par une réaction chimique soit résultant de la combustion d'un gaz comme dans la flamme oxy-acétylénique, la combustion de l'hydrogène ou du propane, soit par une réaction exothermique à l'état liquide à savoir la réaction entre l'oxyde de fer et l'aluminium liquide (aluminothermie).

3.4.2 Procédé de soudage thermochimique

3.4.2.1 Soudage par aluminothermie

Ce procédé se base sur le fait que la réaction entre l'oxyde de fer et l'aluminium liquide selon



est fortement exothermique. L'oxyde de fer et l'aluminium granulé sont mis dans un creuset avec une sortie en bas et la réaction est initiée par une addition chimique fortement oxydante (un peroxyde). Au fur et à mesure que la réaction avance le mélange entre fer liquide et alumine est chauffé à environ 2500°C. Le fer liquide passe par le trou au fond du creuset, s'écoule dans le moule et remplit l'espace entre les pièces à souder. L'alumine étant moins dense que le fer liquide flotte sur le bain de fusion. Ce procédé est utilisé pour des sections très fortes mais aussi à des endroits où il n'y a pas d'électricité, à savoir pour le soudage bout à bout des rails de chemin de fer.

Il existe aussi une variante de ce procédé dans laquelle le fer liquide est seulement utilisé pour fondre légèrement les bouts des pièces à souder et ensuite les pièces sont pressées l'une contre l'autre formant ainsi le joint. Un schéma du procédé d'aluminothermie se trouve en figure 3.31.

3.4.2.2 Le soudage par gaz combustible

L'énergie est fournie par la combustion d'un mélange de deux gaz: un gaz combustible (l'hydrogène, l'acétylène, ou le propane) et un gaz comburant (l'oxygène). Seulement l'acétylène se prête bien pour le soudage de l'acier à cause des densités d'énergie trop faibles des autres combinaisons combustibles, cf. aussi figure 3.7.

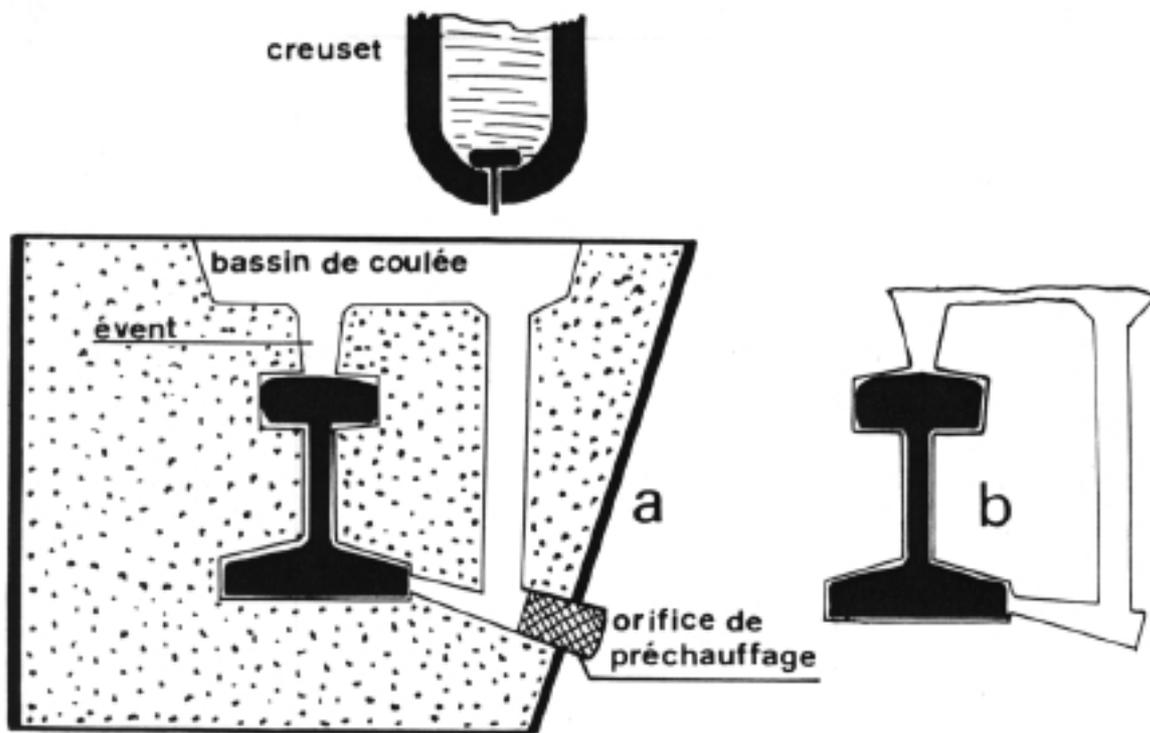


Fig. 3.31: Soudage par aluminothermie des rails: (a) moule prête pour la coulée; (b) soudure avant

L'équipement pour ce procédé est schématisé en figure 3.32. Dans le chalumeau, la proportion entre gaz combustible et comburant et le taux de combustion peut être réglée. Pour des raisons de sécurité, l'acétylène n'est jamais sous grande pression dans le tuyau, tandis que l'oxygène peut être réglé à quelques bars. Dans le chalumeau, cf. figure 3.33, l'oxygène coule très rapidement par une buse produisant une sous-pression et aspire ainsi le gaz combustible. Ceci

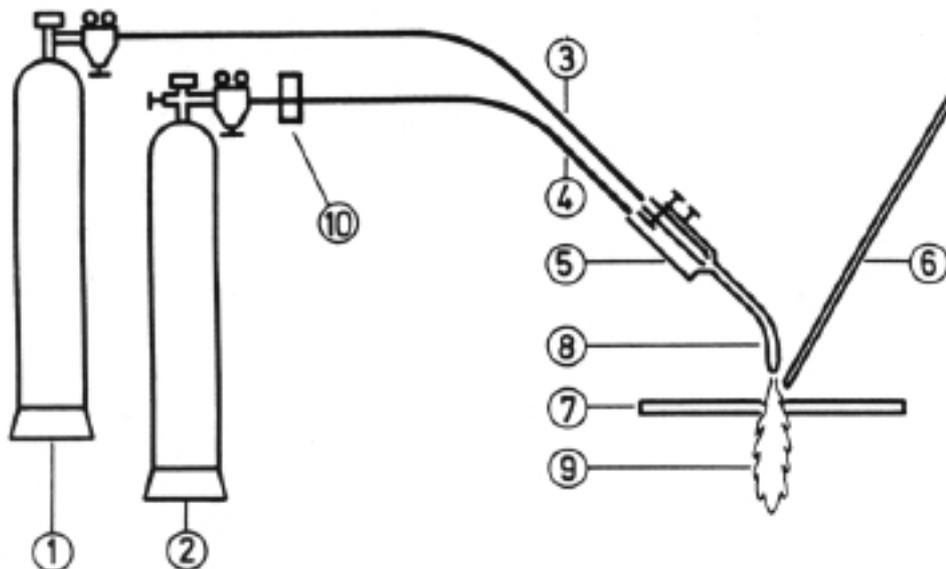


Fig. 3.32: Equipement pour le soudage au chalumeau: bouteilles à gaz combustible (1) et à gaz comburant (2); tuyau de gaz (3,4), pistolet avec buse comprenant le réglage de relation entre gaz comburant et combustible (5), métal d'apport (6), pièce à souder (7), pointe de buse (8), flamme (9) et

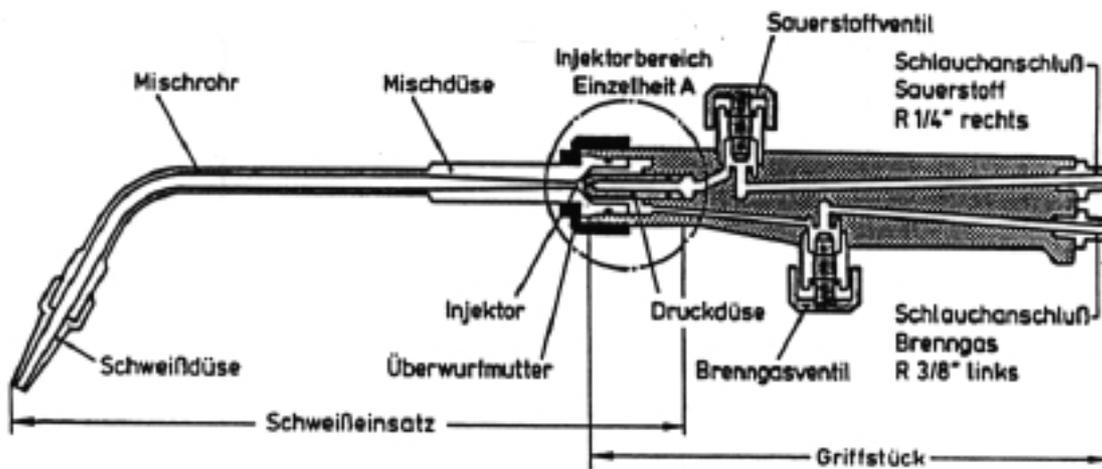


Fig. 3.33: Schéma de détail de la buse: le courant du gaz comburant aspire le gaz combustible selon la loi de Bernoulli engendrant le mélange juste avant de sortir de la buse.

nécessite que les raccords de gaz ne soient pas mélangés. Pour assurer cela, le raccord pour l'oxygène a un filetage à droite alors que l'acétylène a un raccord avec filetage à gauche.

Sauf pour le soudage des tôles très mince, il y a toujours un métal d'apport normalement de même composition que les pièces à souder. Le gaz dans la flamme remplit aussi la fonction de protection ou de conditionnement du bain de fusion. Selon les proportions entre gaz combustible et le comburant une atmosphère oxydante ou réductrice peut être atteinte.

Le faible coût et la flexibilité du système le rend assez répandu dans les atelier mécanique et métallurgiques. Dans le soudage de production, ce procédé est largement remplacé par des procédés sous protection gazeuse qui sont plus économiques et efficaces. Il est maintenant limité aux soudures de réparation, des tôles minces et des tuyauteries. Par contre, il est souvent utilisé pour des soudo-brasages et l'oxycoupage, grâce à une pression d'arc provenant de la pression de gaz.